

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Infrastrutture

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Classe LM-23



Tesi di Laurea Magistrale

Analisi metodologica e numerica degli effetti della circolazione idrica sotterranea sui fenomeni di instabilità superficiale, in presenza di discontinuità topografiche

Relatore

Prof. Ing. Pierluigi Claps

Correlatori

Prof. Ing. Marta Castelli

Prof. Ing. Monica Barbero

Candidata

Giulia Evangelista

Ottobre 2020

1. PROBLEM STATEMENT	10
1.1 IL CONTESTO DEL PROBLEMA	10
1.2 OBIETTIVI E FASI DEL LAVORO.....	12
2. SHALLOW LANDSLIDES: STATO DELLE CONOSCENZE	14
2.1 INTRODUZIONE GENERALE.....	14
2.2 APPROCCI E METODOLOGIE	17
2.2.1 MODELLAZIONE TOPOGRAFICA DEI PROCESSI DI INFILTRAZIONE	17
2.2.2 ANALISI DI STABILITÀ SU SCHEMA DI PENDIO INDEFINITO.....	19
2.2.3 MODELLI IDROLOGICI PER L'ANALISI MACROSCOPICA DEI FLUSSI DI VERSANTE.....	20
2.2.4 MODELLI DI DETTAGLIO PER LA VALUTAZIONE DELLE PRESSIONI INTERSTIZIALI	25
3. CASO STUDIO: L'EVENTO DEL 2-6 NOVEMBRE 1994	29
3.1 SCELTA DEL CASO STUDIO	29
3.2 DESCRIZIONE DELL'EVENTO.....	30
3.3 CARATTERIZZAZIONE DELL'AREA DI INDAGINE	32
3.3.1 DATI PLUVIOMETRICI	44
3.3.2 DISTACCHI INDIVIDUATI	46
4. MODELLAZIONE.....	47
4.1 PROPOSTA METODOLOGICA	47
4.2 IL MODELLO DI RISPOSTA IDROLOGICA	49
4.2.1 ANALISI GEOMORFOLOGICA.....	49
4.2.2 TARATURA DEL MODELLO	56
4.2.2.1 TARATURA DELLA PERMEABILITÀ.....	56
4.2.2.1 TARATURA DELLA COESIONE	57
4.2.3 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO	58
4.2.3.1 LIVELLO 1.....	59
4.2.3.2 LIVELLO 2.....	61
4.2.3.3 LIVELLO 3.....	63
4.3 MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI	64
4.3.1 PENDIO CONTINUO	66
4.3.2 PENDIO INTERESSATO DA DISCONTINUITÀ TOPOGRAFICA	72
CONCLUSIONI.....	78
BIBLIOGRAFIA	81
ALLEGATO 1: CAMPIONE DI OSSERVAZIONI	85

Indice delle Figure

FIGURA 1.1: DENSITÀ DI FRANE (AREA IN FRANA/AREA CELLA) SU MAGLIA DI LATO 1 KM. FONTE: RAPPORTO ISPRA 287/2018 ..	10
FIGURA 1.2: TIPOLOGIA FENOMENI FRANOSI IN ITALIA. FONTE: RAPPORTO ISPRA 287/2018	11
FIGURA 1.3: FATTORI DI INNESCO IN ITALIA. FONTE: CNR_ DATABASE DELLE AREE INTERESSATE DA FENOMENI FRANOSI IN ITALIA .	11
FIGURA 2.1: CLASSIFICAZIONE DELLE FRANE DI VARNES (1978) MODIFICATA DA CARRARA ET AL. (1985). IN ROSSO SONO EVIDENZIATI I PROCESSI OGGETTO DI INDAGINE	14
FIGURA 2.2: COALESCENZA DELLE NICCHIE DI DISTACCO (LANGHE PIEMONTESI 1994). FONTE: PROCESSI DI INSTABILITÀ SUI VERSANTI, IN: EVENTI ALLUVIONALI IN PIEMONTE, REGIONE PIEMONTE, TORINO, 1998	15
FIGURA 2.3: SCHEMATIZZAZIONE DI UNA FRANA PER MOBILIZZAZIONE DELLA COLTRE SUPERFICIALE	16
FIGURA 2.4: A) MESSINA, 2009; B) LANGHE PIEMONTESI, 1994; C) SARNO, 1998	16
FIGURA 2.5: A) SATURAZIONE “HORTONIANA”; B) SATURAZIONE “DUNNIANA”	18
FIGURA 2.6: ANDAMENTO DEL PARAMETRO $C\psi$ IN FUNZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE PER DUE DIFFERENTI TIPOLOGIE DI TERRENI. MODIFICATO DA FREDLUND ET AL. (1996)	20
FIGURA 2.7: PARTIZIONE DEL BACINO SECONDO LO SCHEMA A TUBI DI FLUSSO. FONTE: MONTGOMERY E DIETRICH, 1994	21
FIGURA 2.8: SCHEMATIZZAZIONE DEI FLUSSI IDROLOGICI. FONTE: ROSSO ET AL., 2006.	22
FIGURA 2.9: RAPPRESENTAZIONE DELLA RELAZIONE AREA-TEMPO, FONTE: BARLING ET AL., 1994	24
FIGURA 2.10: SCHEMA DI VERSANTE ADOTTATO NEL MODELLO DI IVERSON.....	25
FIGURA 2.11: DISTRIBUZIONE DELLE PRESSIONI INTERSTIZIALI SECONDO L’APPROCCIO DI IVERSON. FONTE: IVERSON, 2000	25
FIGURA 2.12: SCHEMATIZZAZIONE DELLA SOLUZIONE A BREVE TERMINE ($T \ll L^2/D_0$). FONTE: IVERSON, 2000.....	26
FIGURA 2.13: SCHEMA DI VERSANTE IMPLEMENTATO NELLE VERSIONI TRIGRS 1.0 (A SINISTRA) E TRIGRS 2.0 (A DESTRA). FONTE: BAUM ET AL., 2002, 2008	27
FIGURA 2.14: FLOW CHART RIASSUNTIVO DEI CONTRIBUTI METODOLOGICI INDAGATI	28
FIGURA 3.1: NUMERO DI FRANE PER TIPOLOGIA DI DANNO. FONTE: L’ANALISI DEL DISSESTO IN PIEMONTE. IN: RAPPORTO SULLE FRANE DI ITALIA, 78/2007	29
FIGURA 3.2: INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DELLE LANGHE. FONTE: PROCESSI DI INSTABILITÀ SUI VERSANTI, IN: EVENTI ALLUVIONALI IN PIEMONTE, REGIONE PIEMONTE, TORINO, 1998.....	30
FIGURA 3.3: CASISTICA DEI DIFFERENTI CONTESTI GEOMORFICI NELLA LOCALIZZAZIONE DELLE NICCHIE DI FRANA. FONTE: CAMPUS ET AL., 1998	33
FIGURA 3.4: DISTRIBUZIONE PERCENTUALE DEI 4 CASI INDIVIDUATI. FONTE: CAMPUS ET AL., 1998	33
FIGURA 3.5: DISTRIBUZIONE DEI SOIL SLIPS RELATIVI ALL’EVENTO 1994 NELLE LANGHE (IN ALTO). PARTICOLARE DEL COMUNE DI LEQUIO BERRIA (IN BASSO). FONTE: DATABASE SIFRAP.....	34
FIGURA 3.6: AMPIO SETTORE DI VERSANTE COINVOLTO DA FENOMENI FRANOSI NEL COMUNE DI CERRETTO LANGHE (IN ALTO). FONTE: CAMPUS ET AL., 1998. GEOMETRIE DI TALI DISTACCHI RIPORTATE NEL DATABASE SIFRAP. (IN BASSO)	35
FIGURA 3.7: GRIGLIA DTM REGIONE PIEMONTE. FONTE: GEOPORTALE DELLA REGIONE PIEMONTE. LA GRIGLIA CORRISPONDE CIRCA AL TAGLIO DEI FOGLI IGM 1:50.000	36
FIGURA 3.8: STRUTTURA DATI E DECODIFICA SHAPEFILE PERFORAZIONI (SINISTRA) E CAMPIONI (DESTRA). FONTE: DATASET BANCA DATI GEOTECNICA ARPA PIEMONTE, STRUTTURA DATI.....	37
FIGURA 3.9: DISTRIBUZIONE FORI DI SONDAGGIO (IN VIOLA) E PUNTI DI PRELIEVO CAMPIONI (IN GIALLO) NELLE LANGHE	37
FIGURA 3.10: FLOW CHART. PROCEDURA DI ESTRAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DEI DISTACCHI OGGETTO DI STUDIO	39
TABELLA 3.4: DIMENSIONI DEI DISTACCHI OGGETTO DI INDAGINE.....	41
FIGURA 3.11: CURVA GRANULOMETRICA CORTEMILIA, LOCALITÀ C.NA FLORIN	41
FIGURA 3.12: CURVA GRANULOMETRICA DOGLIANI, LOCALITÀ FRAZ. MARTINA	41
FIGURA 3.13: CURVA GRANULOMETRICA GOTTASECCA, LOCALITÀ VILLA	42
FIGURA 3.14: CURVA GRANULOMETRICA MOMBARCARO, LOCALITÀ C.NA BATTAGLIA	42
FIGURA 3.15: CURVA GRANULOMETRICA MURAZZANO, LOCALITÀ REA	42
FIGURA 3.16: CURVA GRANULOMETRICA NEVIGLIE, LOCALITÀ C.TINELLA	43
FIGURA 3.17: CURVA GRANULOMETRICA PAROLDO, LOCALITÀ COSTARICCA.....	43
FIGURA 3.18: CURVA GRANULOMETRICA ROCCHETTA BELBO, LOCALITÀ PIA	43
FIGURA 3.19: EVOLUZIONE TEMPORALE DELLE PRECIPITAZIONI	44
FIGURA 3.20: DATI DI PIOGGIA REGISTRATI DALLA STAZIONE DI ALBA VACCHERIA (CN).....	45
FIGURA 3.21: DATI DI PIOGGIA REGISTRATI DALLA STAZIONE DI DIANO D’ALBA (CN).....	45

FIGURA 3.22: DATI DI PIOGGIA REGISTRATI DALLA STAZIONE DI RODELLO (CN)	45
FIGURA 3.23: DATI DI PIOGGIA REGISTRATI DALLA STAZIONE DI VERDUNO (CN)	46
FIGURA 3.24: DISTRIBUZIONE SPAZIALE DEI DISTACCHI E DELLE STAZIONI PLUVIOMETRICHE	46
FIGURA 4.1: SCHEMATIZZAZIONE DELLA METODOLOGIA PROPOSTA	47
FIGURA 4.2: SCHEMA DI VERSANTE ADOTTATO NEL MODELLO PROPOSTO DA BORGIA ET AL. (2004)	48
FIGURA 4.3: BACINO IDROGRAFICO INTERESSATO DALL'EVENTO DEL NOVEMBRE 1994	49
FIGURA 4.4: DTM DEI BACINI IDROGRAFICI INTERESSATI DAI FENOMENI DI DISSESTO (IN ALTO). DTM RELATIVO AI FOGLI 192, 193, 210, 211 (IN BASSO)	50
FIGURA 4.5: MAPPA DELLE PENDENZE OTTENUTA MEDIANTE IL COMANDO SLOPE.....	51
FIGURA 4.6: DETTAGLIO DELLA MAPPA DELLE AREE CONTRIBUENTI SPECIFICHE. SI NOTA COME TALE LAYER RISULTI POCO INFORMATIVO	53
FIGURA 4.7: MAPPA DEL LOGARITMO DELLE AREE CONTRIBUENTI SPECIFICHE.....	53
FIGURA 4.8: VISUALIZZAZIONE DEI CONI DI IMPLUVIO	54
FIGURA 4.9: SCHEMA DI FLUSSO ESPLICATIVO DELL'ANALISI GEOMORFOLOGICA DEL DTM	55
FIGURA 4.10: DISTRIBUZIONE TEMPORALE DEI DISTACCHI. L'ORA DI INNESCO NON È DISPONIBILE PER 4 DEI 13 CASI STUDIO	57
FIGURA 4.11: SCHEMA DI PENDIO DI RIFERIMENTO	58
FIGURA 4.12: DEFINIZIONE DELLA SOGLIA DI $W_{CRITICO}$ PER CIASCUNO DEI VERSANTI INDAGATI	60
FIGURA 4.13: ANDAMENTO DEL LIVELLO DI FALDA NORMALIZZATO RISPETTO ALLO SPESSORE DI TERRENO DURANTE LE 24 ORE, NELL'IPOTESI CHE NON VI SIA DEFLUSSO SUPERFICIALE	61
FIGURA 4.14: ANDAMENTO DEL LIVELLO DI FALDA NORMALIZZATO RISPETTO ALLO SPESSORE DI TERRENO DURANTE LE 24 ORE, NELL'IPOTESI CHE L'INFILTRAZIONE RIGUARDI SOLO UN'ALIQUOTA DELLA PRECIPITAZIONE	61
FIGURA 4.15: LOCALIZZAZIONE GEOGRAFICA DEI VERSANTI N° 6 E 7	62
FIGURA 4.16: LOCALIZZAZIONE GEOGRAFICA DEL VERSANTE N° 11	63
FIGURA 4.17: ANDAMENTO DEL LIVELLO DI FALDA NORMALIZZATO RISPETTO ALLO SPESSORE DI TERRENO DURANTE LE 24 ORE, NELL'IPOTESI CHE L'INFILTRAZIONE RIGUARDI SOLO UN'ALIQUOTA DELLA PRECIPITAZIONE	63
FIGURA 4.18: SCHEMATIZZAZIONE DEL METODO DEI CONCI.....	64
FIGURA 4.19: SCHEMA RIASSUNTIVO DEGLI SCENARI SIMULATI	65
FIGURA 4.20: SCHEMA DI PENDIO CONTINUO CON PENDENZA E STRATIGRAFIA REALE	66
FIGURA 4.21: ANDAMENTO DELLA FALDA IDRICA SU VERSANTE REALE CONTINUO NELL'IPOTESI DI SOLA FILTRAZIONE NELLA SEZIONE DI MONTE, CON $A/B=42,4$ M ² /M. PARTICOLARE DEL TRANSITORIO SPAZIALE DI MONTE.....	67
FIGURA 4.22: RAGGIUNGIMENTO DELLA CONDIZIONE DI FLUSSO PARALLELO ALLA STRATIFICAZIONE SU VERSANTE REALE CONTINUO NELL'IPOTESI DI SOLA FILTRAZIONE NELLA SEZIONE DI MONTE, CON $A/B=42,4$ M ² /M.	67
FIGURA 4.23: ANDAMENTO DELLA FALDA IDRICA SU VERSANTE REALE CONTINUO NELL'IPOTESI DI SOLA FILTRAZIONE NELLA SEZIONE DI MONTE, CON $A/B=200$ M ² /M. SATURAZIONE DEL TRATTO DI VALLE DEL VERSANTE	68
FIGURA 4.24: CALCOLO DEL FATTORE DI SICUREZZA E DELLA SUPERFICIE DI SCORRIMENTO CRITICA, CON BACINO CONTRIBUENTE A MONTE $A/B=42,4$ M ² /M	68
FIGURA 4.25: CALCOLO DEL FATTORE DI SICUREZZA E DELLA SUPERFICIE DI SCORRIMENTO CRITICA, CON BACINO CONTRIBUENTE A MONTE $A/B=200$ M ² /M	69
FIGURA 4.26: ANDAMENTO DELLA FALDA IDRICA SU VERSANTE REALE CONTINUO NELL'IPOTESI DI FILTRAZIONE NELLA SEZIONE DI MONTE E INFILTRAZIONE LUNGO IL PENDIO DI INTENSITÀ $9E-4$ M/H	70
FIGURA 4.27: SCHEMA DI PENDIO CONTINUO CON STRATIGRAFIA SEMPLIFICATA.....	70
FIGURA 4.28: ANDAMENTO DELLA FALDA IDRICA SU VERSANTE SEMPLIFICATO CONTINUO NELL'IPOTESI DI SOLA FILTRAZIONE NELLA SEZIONE DI MONTE, CON $A/B=42,4$ M ² /M	71
FIGURA 4.29: ANDAMENTO DELLA FALDA IDRICA SU VERSANTE SEMPLIFICATO CONTINUO NELL'IPOTESI DI SOLA FILTRAZIONE NELLA SEZIONE DI MONTE, CON $A/B=200$ M ² /M	71
FIGURA 4.30: ANDAMENTO DELLA FALDA IDRICA SU VERSANTE SEMPLIFICATO CONTINUO NELL'IPOTESI DI FILTRAZIONE NELLA SEZIONE DI MONTE E INFILTRAZIONE LUNGO IL PENDIO DI INTENSITÀ $9E-4$ M/H.....	72
FIGURA 4.31: SCHEMA DI PENDIO DISCONTINUO CON PENDENZA E STRATIGRAFIA REALE	72
FIGURA 4.32: PARTICOLARE E CONDIZIONI AL CONTORNO APPLICATE NELLA REGIONE DEL TAGLIO	73
FIGURA 4.33: ANDAMENTO DELLA FALDA IDRICA SU VERSANTE REALE DISCONTINUO NELL'IPOTESI DI SOLA FILTRAZIONE NELLA SEZIONE DI MONTE, CON $A/B=42,4$ M ² /M	73

FIGURA 4.34: ANDAMENTO DELLA FALDA IDRICA SU VERSANTE REALE DISCONTINUO NELL'IPOTESI DI FILTRAZIONE NELLA SEZIONE DI MONTE E INFILTRAZIONE LUNGO IL PENDIO DI INTENSITÀ $9E-4$ M/H	74
FIGURA 4.35: CALCOLO DEL FATTORE DI SICUREZZA E DELLA SUPERFICIE DI SCORRIMENTO CRITICA SU VERSANTE REALE DISCONTINUO	74
FIGURA 4.36: ANDAMENTO DELLA FALDA IDRICA SU VERSANTE REALE DISCONTINUO NELL'IPOTESI DI SOLA FILTRAZIONE NELLA SEZIONE DI MONTE.	75
FIGURA 4.37: PARTICOLARE DELL'ANDAMENTO DELLA FALDA IDRICA IN CORRISPONDENZA DELLA DISCONTINUITÀ NELL'IPOTESI DI SOLA FILTRAZIONE NELLA SEZIONE DI MONTE: STRATIGRAFIA REALE (IN ALTO); STRATIGRAFIA SEMPLIFICATA (IN BASSO)	75
FIGURA 4.38: ANDAMENTO DELLA FALDA IDRICA SU VERSANTE REALE DISCONTINUO NELL'IPOTESI DI FILTRAZIONE NELLA SEZIONE DI MONTE E INFILTRAZIONE LUNGO IL PENDIO DI INTENSITÀ $9E-4$ M/H.....	76
FIGURA 4.39: PARTICOLARE DELL'ANDAMENTO DELLA FALDA IDRICA IN CORRISPONDENZA DELLA DISCONTINUITÀ NELL'IPOTESI DI FILTRAZIONE NELLA SEZIONE DI MONTE E INFILTRAZIONE LUNGO IL PENDIO DI INTENSITÀ $9E-4$ M/H: STRATIGRAFIA REALE (IN ALTO); STRATIGRAFIA SEMPLIFICATA (IN BASSO)	76
FIGURA 4.40: CALCOLO DEL FATTORE DI SICUREZZA E DELLA SUPERFICIE DI SCORRIMENTO CRITICA SU VERSANTE OMOGENEO DISCONTINUO	77

Indice delle Tabelle

TABELLA 2.1: EVOLUZIONE DEI MODELLI IDROLOGICI FONDATI SULL'ELABORAZIONE DI INDICI	24
TABELLA 3.1: PRECIPITAZIONI TOTALI GIORNALIERE SUL BACINO DEL TANARO	31
TABELLA 3.2: CARATTERIZZAZIONE DISTACCHI SU PENDIO CONTINUO	40
TABELLA 3.3: CARATTERIZZAZIONE DISTACCHI SU PENDIO CON DISCONTINUITÀ TOPOGRAFICA	40
TABELLA 4.1: AREE CONTRIBUENTI TOTALI (A) E SPECIFICHE (A)	55
TABELLA 4.2: CALIBRAZIONE DEL VALORE DI PERMEABILITÀ SATURA	57
TABELLA 4.3: CALIBRAZIONE DEL VALORE DI COESIONE	58
TABELLA 4.4: NUMERO DI VERSANTI INCONDIZIONATAMENTE INSTABILI AL VARIARE DEI PARAMETRI IN INPUT	59
TABELLA 4.5: VALORI DI $w_{CRITICO}$ PER CIASCUNO PER VERSANTI INDAGATI	60
TABELLA 4.6: TEMPI CARATTERISTICI DEI VERSANTI INDAGATI	62
TABELLA 4.7: LOCALIZZAZIONE GEOGRAFICA DEL VERSANTE MODELLATO	64
TABELLA 4.8: CONDIZIONI AL CONTORNO DI MONTE APPLICATE, IN FUNZIONE DELLA PERMEABILITÀ DELLO STRATO	66
TABELLA 4.9: PERCENTUALE DI SATURAZIONE DEL VERSANTE AL VARIARE DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO IMPOSTE	70
TABELLA 4.10: RIEPILOGO DEI COEFFICIENTI DI SICUREZZA OTTENUTI DA CIASCUNO DEGLI SCENARI SIMULATI	77

Sommario

Il presente lavoro di tesi si colloca nell'ampio scenario delle frane superficiali indotte da precipitazioni.

Nonostante questa sia una tematica ampiamente discussa negli ultimi 50 anni e per la quale la letteratura scientifica offre una notevole quantità di approcci e modelli differenti, esiste ad oggi una difficoltà intrinseca alla natura del problema, legata all'intento ma soprattutto alla necessità di fornire una risposta alla seguente domanda: è possibile selezionare aspetti delle metodologie che permettano di conseguire risultati di validità generale, che siano cioè svincolati dal singolo caso di studio?

Perseguire tale obiettivo implica innanzitutto l'indagine di aree sufficientemente vaste, per le quali esistano campioni di osservazioni numerosi, tali da consentire un'analisi speditiva su classi di versanti appartenenti al medesimo contesto morfologico, litologico e vegetativo.

Lo scopo del lavoro risulta quello di ridurre la distanza di natura metodologica e concettuale esistente tra l'impiego di modelli a basso grado di dettaglio, proposti per esaminare ampi domini di indagine, approccio caratteristico della modellistica idrologica, e quello di modelli complessi alla scala del singolo corpo di frana, identificabili tipicamente nei codici ad elementi finiti.

La ricerca proposta fornisce uno strumento che realizzi un nuovo punto di incontro tra un approccio prettamente idrologico ed uno di stampo più geotecnico, improntato sullo schema tipico di equilibrio limite su pendio indefinito: ruolo chiave svolge la componente geometrica, qui esplicitata mediante la presenza di interruzioni della continuità della coltre superficiale, solitamente dovute ad origine antropica e derivanti, ad esempio, dalla realizzazione di sentieri carrabili o anche di strade.

La tesi esamina l'analisi dei flussi di versante su uno schema di pendio "semi- indefinito" mediante un modello idrologico semplificato, da impiegare come condizione al contorno per una successiva analisi di stabilità, al fine di dimostrare il maggior peso della componente idrologica, esplicitata attraverso l'intercettazione dei flussi idrici. Sono approfonditi gli effetti del "taglio" sulla circolazione idrica all'interno della coltre di suolo, indotti dalla condizione di pressione atmosferica che si instaura in corrispondenza del fronte di taglio, con conseguente incremento delle pressioni interstiziali e variabilità del fattore di sicurezza.

Il percorso verso i metodi atti ad essere applicati ad area vasta implica l'introduzione di diverse semplificazioni nella formulazione dell'approccio proposto. Le analisi di geometrie caratteristiche effettuate mediante applicazione sistematica della modellazione ad elementi finiti consentono da un lato, di mettere a punto una metodologia che garantisca accuratezza, efficienza e replicabilità e, dall'altro, di sviluppare uno strumento flessibile, da impiegare agevolmente come indicatore di incremento locale della suscettibilità a franare, di sicuro interesse per la caratterizzazione dei versanti su vasta area.

Abstract

This Thesis work is placed within the broad scenario of shallow landslides triggered by rainfall. Although it has been a widely explored subject in the last fifty years and for which scientific literature offers a great number of different approaches and models, at present there remains an intrinsic difficulty due to the nature of the problem, that is linked to the intent but above all to the need to provide an answer to the following question: is it possible to select some methodologies aspects that allow us to obtain generally valid results – that is, they are free from individual case studies?

First, to fully achieve this goal, we need to investigate sufficiently large areas, for which a significant number of observations samples exist, that give us the opportunity to carry out a quick analysis on classes of slopes belonging to the same morphological, lithological and vegetative context.

The study focuses on the effort to close the methodological and conceptual gap between the use of low-detail models proposed to explore wide investigation domains, a characteristic approach of hydrological modelling, and that of complex ones, applied to single hillslope scale, typically related to the finite elements' codes.

Specifically, this Thesis aims to provide a tool to achieve a new meeting point between a purely hydrological perspective and a more geotechnical one, based on the typical infinite slope analysis: the geometric component plays a key role, here explained through the presence of topsoil continuity interruptions, usually due to anthropic origin and resulting, for example, from the construction of driveways or even roads.

The analysis of slope flows on a “semi-infinite” slope scheme is investigated by means of a simplified hydrological model, to be used as a boundary condition for further stability analysis, in order to demonstrate the greater weight of the hydrological component, explained through water flows interception. Thus, the study enquires road-cut effects on groundwater circulation, induced by the atmospheric pressure condition that occurs at the cutting front, with a consequent increase in the interstitial pressures field and safety factor variability.

The way towards methods to be applied to a wide area involves the introduction of different simplifications in the formulation of the proposed approach. The analysis of characteristic geometries carried out by systematic applications of finite elements modelling allows us, on the one hand, to tune a methodology that guarantees reliability, efficiency and replicability and, on the other, to develop a flexible tool to be easily used as an indicator of local increase of susceptibility to landslide, that's of great interest for slopes characterization over large areas.

1. PROBLEM STATEMENT

1.1 IL CONTESTO DEL PROBLEMA

L'edizione 2018 del rapporto sul dissesto idrogeologico in Italia realizzato da ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) fornisce, ad oggi, il quadro di riferimento aggiornato sulla pericolosità da frana. Degli oltre 900mila eventi censiti presso le banche dati degli Stati europei, quasi due terzi sono italiani: 620.808 episodi che hanno coinvolto il 7,9% del territorio nazionale, corrispondente ad un'area di 23.700 km².

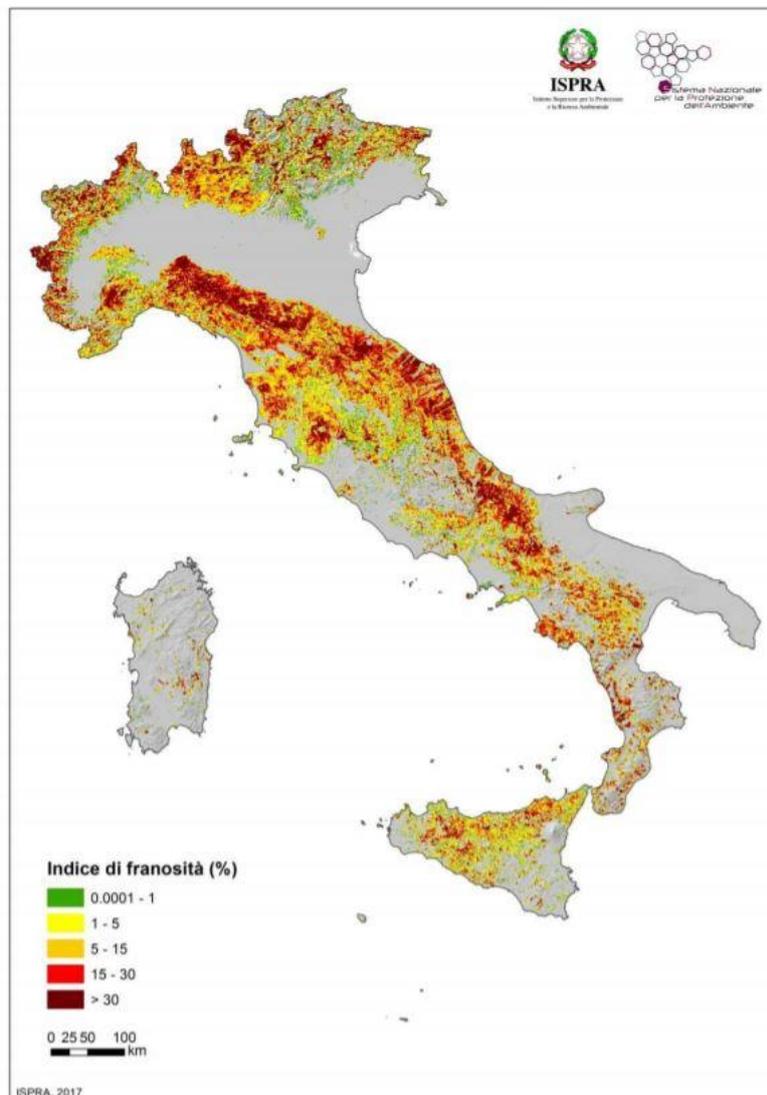


Figura 1.1: Densità di frane (area in frana/area cella) su maglia di lato 1 km. FONTE: Rapporto ISPRA 287/2018

Di questi, circa il 28% viene classificato come fenomeni a cinematiso rapido (*rock slide, rock avalanche, soil slip, debris slide, debris flow*).

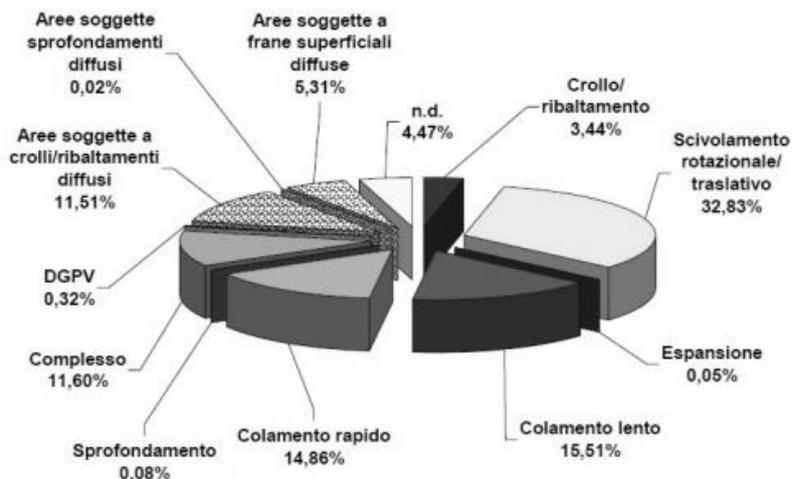


Figura 1.2: Tipologia fenomeni franosi in Italia. FONTE: Rapporto ISPRA 287/2018

Lo studio mette in luce come la popolazione a rischio frane residente nelle aree a pericolosità PAI elevata e molto elevata ammonti a 1.281.970 abitanti, pari al 2,2% del totale, con un incremento del 4,7% rispetto all'elaborazione 2015.

In tale contesto, le colate rapide e i dissesti per instabilità della coltre superficiale, oggetto del presente lavoro di tesi, hanno causato negli ultimi decenni ingenti danni a centri abitati e infrastrutture di comunicazione sia in termini di perdita di vite umane, sia in termini economici (es. Val Vigizzo, 1978; Tresenda (SO), 1983; Langhe e Valsesia, 1994; Versilia, 1996; Sarno e Quindici, 1998; Piemonte e Valle d'Aosta, 2000; Val Canale - Friuli Venezia Giulia, 2003; Messina, 2009).

In misura generale, non è corretto supporre una corrispondenza univoca tra fenomeni franosi e cause d'innescò, in quanto l'evoluzione di una frana può essere condizionata da differenti fattori che interagiscono in maniera più o meno complessa determinando l'instabilità di un versante. Tuttavia, è possibile stabilire una relazione diretta con il verificarsi di eventi pluviometrici brevi e particolarmente severi: in funzione di quelle che sono le condizioni iniziali di umidità del suolo, l'intensità e la durata della precipitazione, così come l'altezza di pioggia complessiva, il fenomeno di infiltrazione induce una riduzione della suzione, con conseguente incremento delle pressioni interstiziali e caduta della resistenza a taglio del materiale.

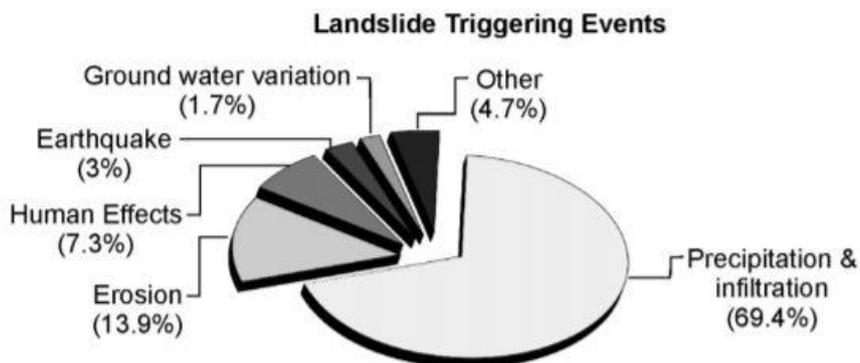


Figura 1.3: Fattori di innescò in Italia. FONTE: CNR_ Database delle aree interessate da fenomeni franosi in Italia

Nella letteratura scientifica, molti sono i tentativi di determinare la pericolosità di un evento franoso, la quale passa attraverso il concetto della previsione, sia essa di natura spaziale o temporale.

La suscettibilità spaziale si traduce nell'individuazione delle condizioni per cui un versante è o meno in equilibrio per mezzo di un fattore di sicurezza, dato da:

$$FS = \frac{\text{Fattori stabilizzanti}}{\text{Fattori destabilizzanti}}$$

Ciò avviene mediante l'impiego di:

- Tecniche di statistica multivariata, le quali consentono di valutare il peso statistico di ciascuno dei fattori predisponenti all'innescò, considerandoli simultaneamente;
- Modelli fisicamente basati, orientati verso la modellazione fisica dei fenomeni franosi, in maniera più o meno dettagliata (*Montgomery and Dietrich, 1994; Iverson, 2000; Borga et al., 2002; Rigon et al., 2006; Rosso et al., 2002; Baum et al., 2008*). Questo aspetto verrà trattato ampiamente nel Capitolo 2.

La seconda prevede invece la determinazione di soglie pluviali di innescò, dunque la quantità di precipitazione critica necessaria all'innescò del fenomeno. Queste si distinguono in:

- empiriche, ricavate dall'osservazione di casi reali;
- simulate, derivate cioè dall'applicazione di un modello di innescò, valutando l'effetto di precipitazioni di diversa durata e intensità.

1.2 OBIETTIVI E FASI DEL LAVORO

Oltre alla presente introduzione, il lavoro è organizzato in ulteriori quattro capitoli, all'interno dei quali vengono proposti i seguenti obiettivi:

Obiettivo 1.

Fornire una trattazione il più possibile organica dei principali contributi metodologici di natura concettuale, soffermandosi in particolare sulla modellazione topograficamente basata e discutendone il valore nel contesto della letteratura esistente. Vengono inoltre esaminate le condizioni di validità delle ipotesi tipicamente assunte da gran parte dei modelli esistenti, quali la stazionarietà, la condizione di falda idrica parallela al versante, l'assunzione di pendio indefinito (Capitolo 2).

Obiettivo 2.

Sulla base delle osservazioni presentate nel punto precedente, definire una condizione di criticità che, in maniera coerente con la variabilità altezza di pioggia-durata, possa fornire una relazione analoga nei confronti di un'"altezza di falda critica". Ciò permetterà di mettere a fuoco le ragioni per cui una determinata area risulti più suscettibile a franare piuttosto che un'altra. (Capitolo 4).

Obiettivo 3.

Valutare l'effetto della presenza di interruzioni della coltre superficiale, solitamente di origine antropica e derivanti, ad esempio, dalla realizzazione di sentieri carrabili o anche di strade. A tal proposito, si vuol mettere in evidenza la correlazione esistente tra l'innesco di *shallow landslides* e la presenza di specifiche condizioni al contorno di natura idraulica e geometrica, avvalendosi di una modellazione agli elementi finiti che permetta di ricostruire l'andamento della falda idrica in corrispondenza del taglio (Capitoli 3 e 5).

Ciò avviene con riferimento ai numerosi distacchi avvenuti nei giorni tra il 2 e il 6 novembre 1994 nella regione collinare delle langhe piemontesi, i quali verranno descritti nel Capitolo 3.

2. SHALLOW LANDSLIDES: STATO DELLE CONOSCENZE

Nel presente capitolo, dopo aver presentato un quadro generale del problema, comprensivo dei caratteri distintivi delle frane superficiali, si riportano alcune considerazioni inerenti ai processi di infiltrazione e di scambio idrico saturo/non saturo alla scala di versante. Viene infine discusso lo stato dell'arte relativo ai molteplici approcci esistenti in letteratura riguardo la modellazione dei fenomeni di instabilità della coltre superficiale.

2.1 INTRODUZIONE GENERALE

Il termine *frana* è comunemente utilizzato in riferimento al “*movimento di una massa di roccia, detrito o terra lungo un pendio*” (Cruden, 1911), sotto l'azione di forzanti esterne.

Per quanto riguarda la classificazione di tali fenomeni, è univocamente riconosciuta dalla comunità scientifica quella fornita da Varnes (1978), integrata e adattata da Carrara *et al.* (1985) al quadro geologico italiano; lo schema in questione è articolato in 7 classi di movimento principali (crolli, ribaltamenti, scorrimenti rotazionali, scorrimenti traslativi, espansioni laterali, colate e movimenti complessi), ciascuna delle quali è ulteriormente distinta in funzione della tipologia di materiale coinvolto.

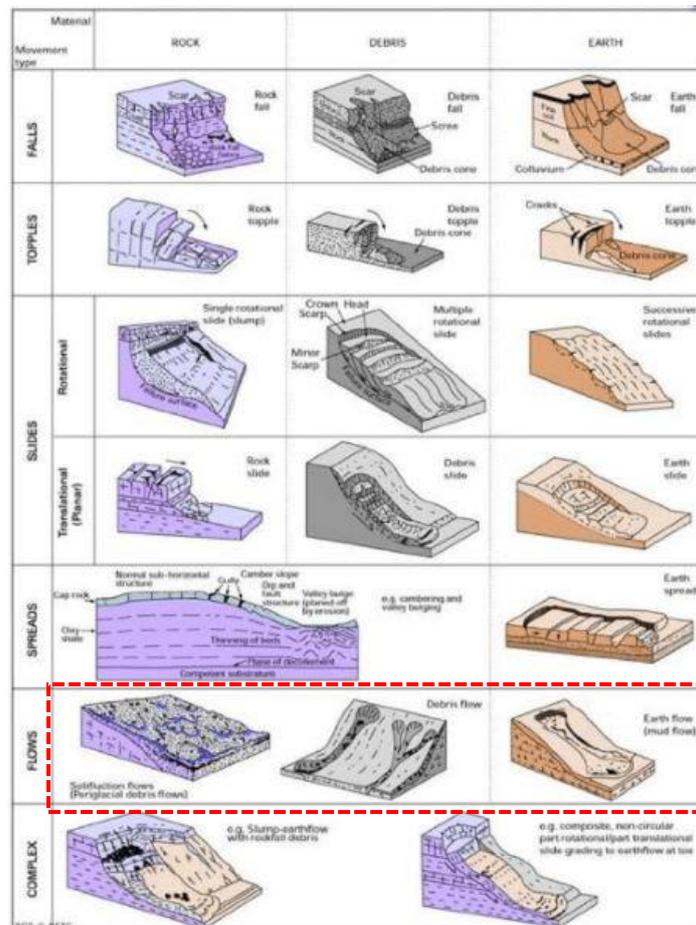


Figura 2.1: Classificazione delle frane di Varnes (1978) modificata da Carrara *et al.* (1985). In rosso sono evidenziati i processi oggetto di indagine

Come anticipato nel precedente capitolo, la presente tesi si concentra su quella classe di fenomeni nei quali la superficie di scorrimento può considerarsi collocata all'interno dello strato superficiale di suolo, senza interessare il *bedrock* sottostante.

Questa tipologia di processi, noti in letteratura come *shallow landslides*, si sviluppa frequentemente in ambiente prealpino ed in zone collinari, interessando con maggiore frequenza versanti con pendenze comprese tra i 25° e i 40°, in zone per lo più a pascolo o prato. Sono tipicamente contraddistinte da spessori modesti, dell'ordine del metro di profondità, elevata velocità di movimento (fino a 50km/h), traducibile in un'importante energia di impatto, assieme alla forte dipendenza dalle precipitazioni e dalla mancanza, o quasi, di indizi premonitori.

È inoltre caratteristica l'elevata densità di singoli fenomeni per unità di superficie (esemplare è il caso delle Langhe piemontesi nel novembre 1994, in cui sono stati censiti circa 200 distacchi per km²); di frequente, si verifica l'aggregazione di singoli fenomeni, anche di decine di frane, con conseguente incremento in termini di estensione areale. (*Campus et al.*, 1998).



Figura 2.2: Coalescenza delle nicchie di distacco (Langhe piemontesi 1994). FONTE: *Processi di instabilità sui versanti*, in: *Eventi alluvionali in Piemonte, Regione Piemonte, Torino, 1998*

Il distacco è caratterizzato da:

- Un coronamento (o nicchia di primo distacco), spesso situato in zone di convergenza topografica, in cui si realizza la confluenza dei flussi sub superficiali. In tal senso sono da considerare le svariate forme di terrazzamento, di origine sia naturale che antropica, così come eventuali depressioni nelle quali possono accumularsi maggiori quantità d'acqua.

- Una zona di trasporto e accumulo, in cui il materiale può conservarsi integro oppure subire una liquefazione, più o meno parziale, in funzione del contenuto d'acqua, delle caratteristiche geotecniche e geologiche dei terreni coinvolti. I materiali fluidificati si incanalano così nelle incisioni dei versanti, trasformandosi in colate detritiche.

Nei tratti in cui si verifica una riduzione della pendenza, si assiste alla fase di arresto sotto forma di deposito lobato.

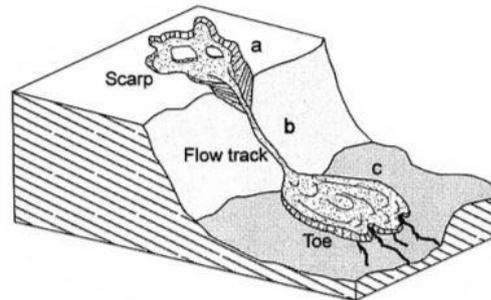


Figura 2.3: Schematizzazione di una frana per mobilizzazione della coltre superficiale

Si riportano, a titolo di esempio, immagini relative ad alcuni dei casi di frane superficiali citati nel paragrafo 1.1.



Figura 2.4: a) Messina, 2009; b) Langhe piemontesi, 1994; c) Sarno, 1998

2.2 APPROCCI E METODOLOGIE

2.2.1 MODELLAZIONE TOPOGRAFICA DEI PROCESSI DI INFILTRAZIONE

Come è noto, il processo di infiltrazione risulta strettamente connesso alla variazione dello stato tensionale nel terreno: l'aumento del contenuto d'acqua, dunque delle pressioni interstiziali all'interno dei pori, si traduce in una riduzione degli stress effettivi, ovvero della pressione intergranulare tra le particelle solide. In accordo al criterio di rottura di Mohr-Coulomb, ciò provoca una riduzione della resistenza a taglio del materiale, intesa a livello macroscopico come la resistenza allo scorrimento offerta dalle singole particelle sottoposte ad azioni tangenziali:

$$\tau = \sigma' \cdot \tan\varphi' = (\sigma - u_w) \cdot \tan\varphi'$$

essendo σ la tensione totale verticale e φ' l'angolo di attrito interno effettivo.

Da un punto di vista qualitativo, tali dinamiche risultano dominate:

- dalle caratteristiche del suolo, quali tessitura, struttura, presenza di apparati radicali, etc.
- dalle proprietà superficiali, in termini di uso del suolo, copertura vegetale, scabrezza, etc.
- dalle condizioni di flusso, quali carico idraulico, temperatura del suolo e dell'acqua, etc.

Ai fini dello studio che si intende condurre, l'effetto di tali aspetti, locali, verrà trascurato, focalizzandosi piuttosto sul ruolo della morfologia del territorio.

Vari sono stati i modelli, di natura empirica o ricavati per via analitica, proposti nel corso degli anni per la modellazione del processo di infiltrazione.

L'approccio più rigoroso per la trattazione del moto dell'acqua in un mezzo parzialmente saturo, impiegato da vari autori (*Baum et al.*, 2008; *Iverson*, 2000; *Liu et al.*, 2002; *Rigon et al.*, 2006), prevede la soluzione dell'equazione di Richards (1931), ottenuta dalla combinazione dell'equazione di Darcy, formulata per un mezzo non saturo, e del principio di conservazione della massa:

$$\nabla[D(\theta) \cdot \nabla(\theta)] + \frac{\partial}{\partial z} K(\theta) = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

dove:

- z è la coordinata verticale [L];
- θ è il contenuto d'acqua volumetrico [-];
- $K(\theta)$ è il tensore della conducibilità idraulica [LT^{-1}];
- $D(\theta)$ è la diffusività capillare, definita come $K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial \theta}$ [L^2T^{-1}];
- $\Psi(\theta)$ è il carico di suzione [L].

La soluzione dell'equazione richiede l'attribuzione di specifiche condizioni iniziali, oltre che di modelli di chiusura per le funzioni $K(\theta)$ e $\psi(\theta)$.

Tra i modelli fisici approssimati si citano quello di Green-Ampt (1911), nel quale si ipotizza un profilo di umidità del suolo semplificato, rappresentato da un movimento dell'acqua "a pistone" lungo la verticale ed un fronte di bagnatura orizzontale, ma in particolar modo il modello di Horton (1933): si tratta di un'equazione largamente utilizzata negli anni in virtù della sua

semplicità di utilizzo, nella quale la capacità di infiltrazione decresce in maniera esponenziale in funzione del parametro k e delle condizioni iniziali del suolo:

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

essendo:

- f_0 la capacità di infiltrazione massima per $t = 0$;
- f la capacità di infiltrazione al tempo t ;
- f_c la capacità di infiltrazione a $t \rightarrow \infty$;
- k una costante empirica [T^{-1}];
- t l'istante temporale dall'inizio dell'evento piovoso.

Lo schema *hortoniano* fa riferimento al cosiddetto meccanismo di “eccesso di infiltrazione”, in cui si ipotizza che il deflusso superficiale avvenga qualora l'intensità di precipitazione superi la capacità di infiltrazione del terreno.

Dunne e Black (1970) e successivamente Dunne et al. (1975) introducono il concetto di meccanismo per “eccesso di saturazione” anche detto *dunniano*: secondo tale approccio, considerando in questa sede la sola aliquota di flusso sotterraneo, si ha produzione di ruscellamento superficiale nel momento in cui viene meno la possibilità di immagazzinamento dell'acqua da parte del terreno. Esso interessa dunque un'area già saturata dall'affioramento della falda idrica per effetto della precipitazione e del contributo del flusso sub-superficiale.

Risulta evidente come in questa seconda proposta sia evidenziato il ruolo degli scambi idrici laterali.

Il processo *hortoniano* implica in definitiva una saturazione che procede dall'alto, quello *dunniano*, al contrario, dal basso; i due meccanismi sono rappresentati schematicamente in Figura 2.5.

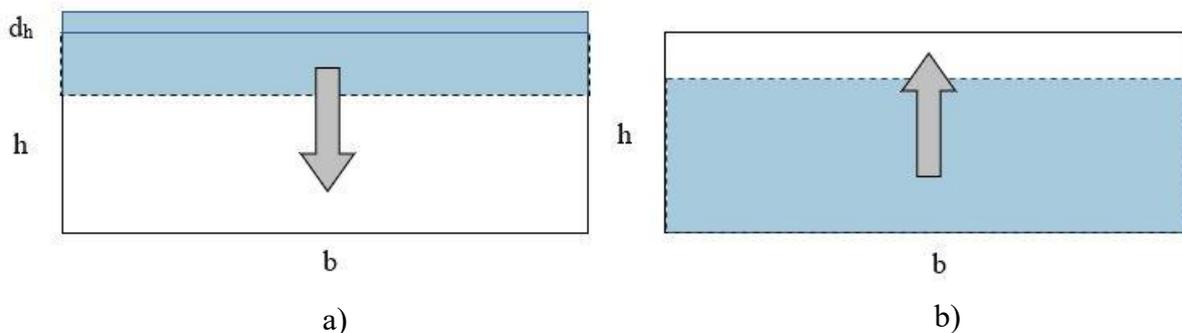


Figura 2.5: a) Saturazione “hortoniana”; b) Saturazione “dunniana”

La proposta di Dunne conduce verso la definizione del concetto di area contributiva variabile, intesa come l'area di raccolta a monte per unità di larghezza lungo le isoipse: si assume che la porzione di terreno satura non interessi contemporaneamente tutto il bacino ma si espanda e si contraiga nel corso dell'evento in funzione dell'entità dei due contributi dominanti. Tale principio è peraltro legato all'interazione tra infiltrazione e moto nel mezzo non saturo, che a sua volta interagisce con il moto nel mezzo saturo.

Questa concettualizzazione sta alla base di alcuni semplici modelli (O' Loughlin, 1986; Montgomery e Dietrich, 1994; Barling et al., 1994; Borga et al., 2002; Rosso et al., 2002), i quali perseguono il filone di una modellazione topograficamente basata: in altre parole, l'altezza della falda idrica al di sopra del *bedrock* impermeabile è espressa come una funzione

di un indice topografico, noto in letteratura come *TWI* (*Topographic Wetness Index*). Esso è definito come il rapporto tra l'area contribuente specifica (Area contribuente a monte del pendio per unità di larghezza) e la pendenza del versante.

Un parametro così concepito consente di individuare le regioni sature in maniera efficace e più speditiva rispetto alla risoluzione di equazioni differenziali alle derivate parziali: maggiore è il valore del TWI, maggiore è la tendenza dell'area alla saturazione.

In particolare, lo studio di Borga et al. (2002) è orientato verso l'impiego di un indice topografico "quasi-dinamico" sulla scia delle ricerche di Barling et al. (1994), approccio che verrà largamente indagato nei paragrafi successivi.

Da una simile metodologia deriva la definizione di un criterio morfologico di controllo che permetta di valutare quale sia l'influenza delle forme geomorfologiche sull'idrologia satura/insatura e sul franamento superficiale. Si tratta di un aspetto ben noto da un punto di vista qualitativo e modellato quantitativamente nella ricerca condotta da Formetta et al. (2016).

L'influenza della forma del versante sulla suscettibilità a franare risiede nella distribuzione del contenuto d'acqua: versanti piani o convessi risultano essere più stabili di quelli concavi, nei quali è favorita la formazione di una falda idrica, con conseguente tendenza della pressione a crescere più rapidamente (*Sidle et al.*, 1985). Tali differenze aumentano all'aumentare dell'area contribuente e della pendenza del versante, in virtù della maggiore tendenza alla distribuzione laterale del flusso.

2.2.2 ANALISI DI STABILITÀ SU SCHEMA DI PENDIO INDEFINITO

Nell'ambito dei modelli cosiddetti fisicamente basati, all'analisi dei flussi di versante segue un'analisi di stabilità, che implica tipicamente l'utilizzo dello schema di pendio indefinito, valido sotto le ipotesi di:

- spessore della coltre di suolo interessata dall'instabilità trascurabile rispetto all'estensione del versante;
- angolo di inclinazione del versante costante;
- caratteristiche del suolo uniformi lungo la direzione del pendio;
- superficie di rottura parallela all'inclinazione del versante;
- validità del criterio di rottura di Mohr-Coulomb.

La suscettività a franare è espressa mediante un fattore di sicurezza, definito come il rapporto tra le forze stabilizzanti F_r e quelle destabilizzanti F_d agenti:

$$FS = \frac{F_r}{F_d}$$

La condizione di rottura corrisponde ad un valore di FS pari all'unità.

L'interazione tra la componente idrologica e quella geotecnica avviene inserendo nel modello di instabilità l'output proveniente dalla precedente analisi dei flussi in termini di pressioni interstiziali.

Introducendo l'ipotesi di parziale saturazione del terreno, questa si riflette anche sulla stabilità del pendio: ciò produce una variabilità nel calcolo del fattore di sicurezza, di cui esistono varie formulazioni.

Fredlund e Rahardjo (1978) propongono il seguente criterio di rottura:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan\varphi' + (u_a - u_w) \cdot \tan\varphi^b$$

dove:

- u_a è la pressione dell'aria all'interno dei pori;
- φ^b è l'angolo di resistenza al taglio per variazione di suzione di matrice, $(u_a - u_w)$.

Per suoli aventi un grado di saturazione inferiore a 0,85, Peterson (1988) propone:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan\varphi' + C_\psi$$

dove il termine C_ψ costituisce l'incremento di coesione apparente dovuto alla suzione, funzione del grado di saturazione del terreno, come rappresentato in Figura 2.6:

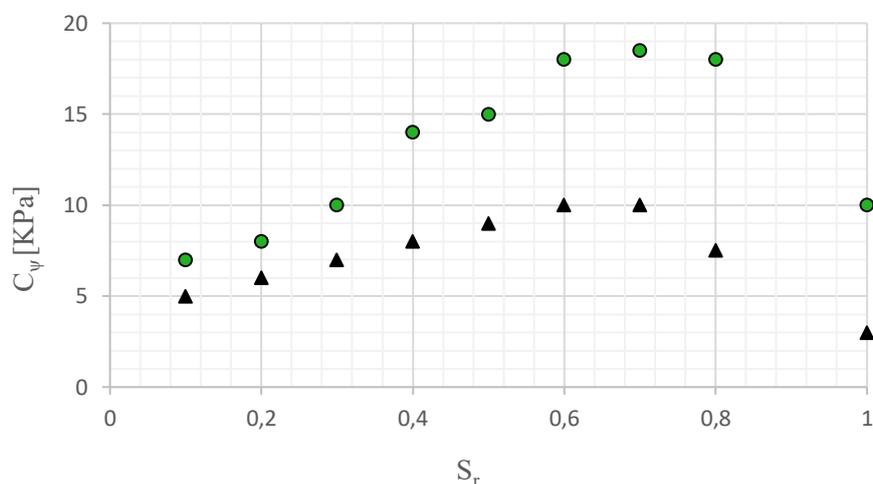


Figura 2.6: Andamento del parametro C_ψ in funzione del grado di saturazione per due differenti tipologie di terreni. Modificato da Fredlund et al. (1996)

Nel presente lavoro si è scelto di trascurare tale contributo.

Nei successivi paragrafi verranno presentati più nello specifico i modelli sopra citati. È possibile organizzare la trattazione distinguendo da un lato un filone basato sull'elaborazione di criteri morfologici a differente grado di complessità, implementati sui modelli digitali del terreno in formato raster. Dall'altro, uno più di dettaglio formulato sulla soluzione dell'equazione di Richards, il quale si propone di studiare i meccanismi di interazione terreno-infiltrazione, valutando gli effetti della variazione delle pressioni interstiziali.

2.2.3 MODELLI IDROLOGICI PER L'ANALISI MACROSCOPICA DEI FLUSSI DI VERSANTE

Nell'ipotesi di formazione del deflusso superficiale per eccesso di saturazione del terreno secondo il meccanismo *dunniano*, l'analisi dei flussi idrici lungo un pendio può essere condotta

sulla base di un semplice schema introdotto dal modello TOPOG (O'Loughlin, 1986). La geometria del sistema viene riportata in Figura 2.7: si tratta un modello fisicamente basato a parametri distribuiti costruito sul concetto di tubo di flusso, in cui cioè la partizione del bacino avviene in termini di curve di livello e linee di forza del campo di moto, ad esse ortogonali.

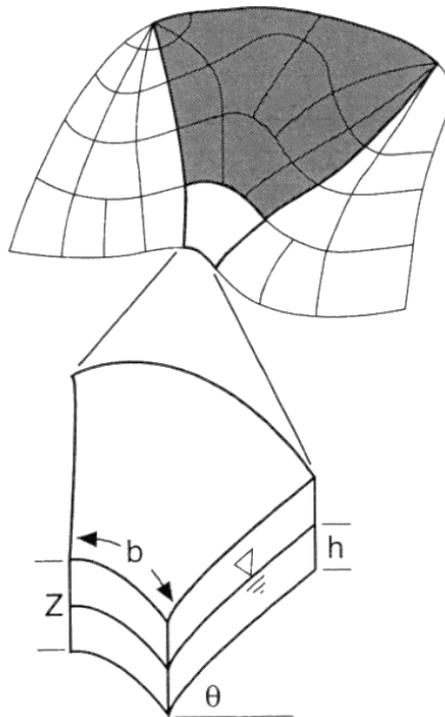


Figura 2.7: Partizione del bacino secondo lo schema a tubi di flusso. FONTE: Montgomery e Dietrich, 1994

Tale approccio si propone di semplificare la complessità dei processi idrologici mediante un modello stazionario il quale presuppone che il flusso sub-superficiale si sviluppi prevalentemente in direzione parallela al pendio nella sola porzione di suolo saturo; la condizione di gradiente idraulico coincidente con la pendenza locale è nota in letteratura come approssimazione di Dupuit.

Sotto le ipotesi di:

- precipitazione uniforme su tutto il bacino;
- conducibilità idraulica costante lungo la verticale;

e imponendo la conservazione della massa in condizioni stazionarie, si ottiene:

$$a \cdot p = h \cdot k_{sat} \cdot \sin\theta$$

essendo:

- a l'area contribuente specifica, definita come A/b [L]
- p l'intensità di pioggia che raggiunge la zona saturo [LT^{-1}];
- h l'altezza della falda al di sopra del *bedrock* impermeabile [L];
- k_{sat} la conducibilità idraulica a saturazione [LT^{-1}];
- θ l'angolo di inclinazione del versante [$^{\circ}$].

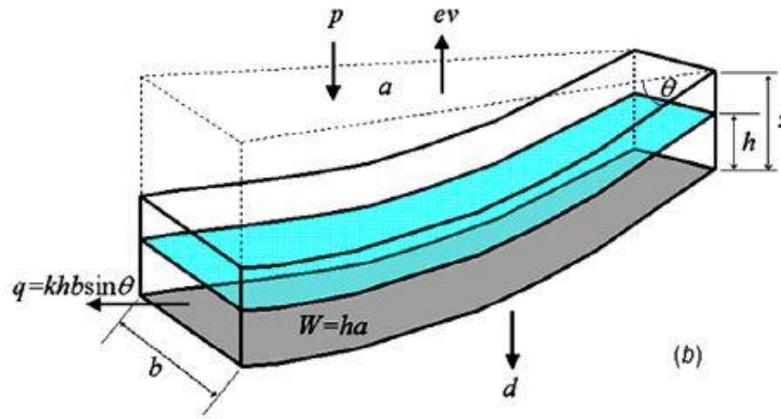


Figura 2.8: Schematizzazione dei flussi idrologici. FONTE: Rosso et al., 2006.

Ne deriva l'altezza locale della falda, definita come segue:

$$h = \frac{p}{k_{sat}} \frac{A}{b \sin \beta} = \frac{p}{k_{sat}} TWI$$

Sebbene centrata nel determinare il ruolo della topografia sulla distribuzione spaziale delle instabilità, una simile modellazione non è in grado di cogliere l'influenza della variabilità degli eventi di pioggia sulla stabilità dei pendii.

Una successiva elaborazione è rappresentata dal modello introdotto da Rosso-Rulli-Vannucchi (2002), il quale muove dall'impostazione del modello a tubi di flusso, introducendo la componente transitoria in modo da tenere conto della durata del fenomeno.

Una simile impostazione fornisce un criterio di controllo non soltanto topografico ma anche di natura climatica.

In riferimento allo schema riportato in Figura 2.8, l'equazione di continuità scritta per il volume di controllo W porta ad ottenere:

$$ap - q = \frac{dW}{dt} = a \frac{dh}{dt}, \text{ per } h \leq z$$

$$ap - q = r, \text{ per } h > z$$

indicando con r l'aliquota di ruscellamento superficiale e con t la durata dell'evento piovoso.

Il flusso nella porzione satura di terreno è esprimibile attraverso la legge di Darcy:

$$q = (bh \cos \vartheta) K_{sat} \tan \vartheta = bh K_{sat} \sin \vartheta$$

che integrata, imponendo la condizione $h(0) = 0$, fornisce

$$h = \frac{ap}{bK_{sat} \sin \theta} \left(1 - e^{-\frac{bK_{sat} \sin \theta}{a} t} \right), \text{ se } ap(bK_{sat} \sin \theta)^{-1} \leq z$$

e, se $ap(bK_{sat} \sin \theta)^{-1} > z$

$$\left\{ \begin{array}{l} h = \frac{ap}{bK_{sat}\sin\theta} \left(1 - e^{-\frac{bK_{sat}\sin\theta}{a}t} \right), \text{ se } t \leq -\frac{a}{bK_{sat}\sin\theta} \ln \left(1 - \frac{bT\sin\theta}{ap} \right) \\ h = z, \text{ se } t > -\frac{a}{bK_{sat}\sin\theta} \ln \left(1 - \frac{bT\sin\theta}{ap} \right) \end{array} \right.$$

Si nota come, a parità di pendenza del pendio, all'aumentare del rapporto a/b, la sezione di drenaggio diminuisca, con conseguente aumento dell'altezza di falda h.

Integrando il contenuto idrico fornito dal modello idrologico nello schema geomeccanico (nell'ipotesi di terreno privo di coesione) è possibile elaborare delle soglie pluviali di instabilità del pendio in funzione della durata della precipitazione:

$$p_{CR}(t) = \frac{T \frac{b}{a} \sin\theta \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\varphi} \right)}{\left(1 - e^{-\frac{bK_{sat}\sin\theta}{a}t} \right)}$$

dove T è la trasmissività idraulica della coltre, definita come il prodotto $K_{sat} \cdot h$ [L^2T^{-1}], φ è l'angolo di attrito interno [$^\circ$], ρ_s e ρ_w sono rispettivamente la densità del suolo secco e la densità dell'acqua [ML^{-3}].

Da qui la determinazione della frequenza critica, dunque del periodo di ritorno, con cui si manifesta l'instabilità di versante accoppiando la precedente equazione con quella delle curve di possibilità pluviometrica.

Alla variabilità temporale conseguente all'aver rilassato l'ipotesi di stazionarietà viene ora affiancato il concetto di variabilità spaziale. Nella metodologia elaborata da Rosso-Rullì-Vannucchi infatti tutta l'area contribuyente viene presa in considerazione ai fini della formazione della portata subsuperficiale; ne deriva che in ogni punto del bacino sia raggiunto l'equilibrio in termini di flussi, ovvero che l'evento di pioggia duri a sufficienza affinché l'intero versante raggiunga l'equilibrio afflusso/deflusso. Tuttavia, la velocità dei flussi sotterranei nei moti di filtrazione può essere considerata così modesta che molti punti all'interno del bacino ricevono contributo solo da una piccola porzione dell'area contribuyente totale, dunque il regime del flusso sotterraneo è in uno stato di "non-equilibrio" dinamico. Ciò risulta ancor più vero nel caso in cui si trattino eventi piovosi di breve durata, tipicamente inferiore alle 12 ore.

A tal proposito, il modello idrologico proposto da Borga (2002) riprende il concetto di indice topografico "quasi-dinamico" QDWI (*Quasi Dynamic Wetness Index*) elaborato da Barling et al. (1994), ricavato come segue:

affiancando all'equazione di Darcy la definizione della velocità di filtrazione efficace

$$v = \frac{q}{\eta} = \frac{k_{sat}\tan\theta}{\eta}$$

essendo η la porosità efficace e, considerato lo schema riportato in Figura 2.9, il tempo impiegato dal flusso idrico per muovere tra due generici punti P e Q è definito come:

$$t_{PQ} = \int_P^Q \frac{ds}{v} = \int_P^Q \frac{\eta}{k_{sat}\tan\theta} ds$$

Sulla base della precedente equazione, è possibile tracciare delle isocrone le quali, per ciascun valore di t , rappresentano la frazione di area contribuyente $A(t)$ associata ad un tratto di isoipsa $w(x)$ dopo un tempo di pioggia pari a t .

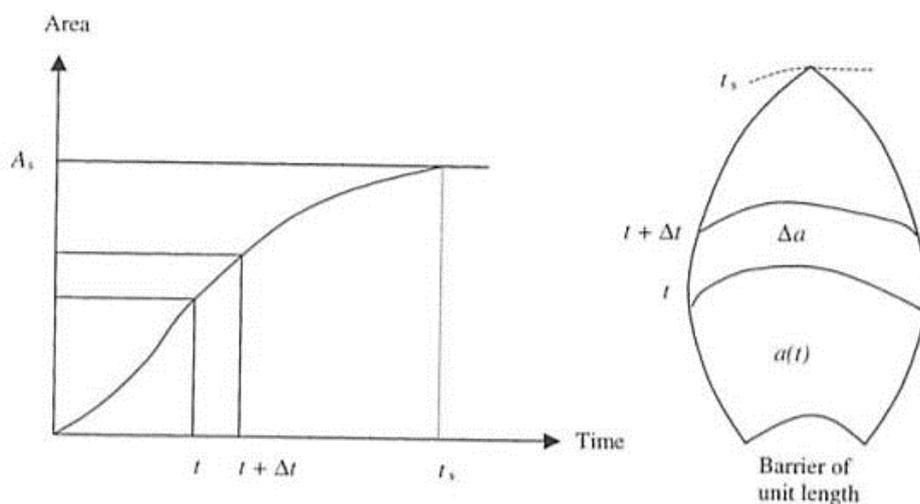


Figura 2.9: Rappresentazione della relazione area-tempo, FONTE: Barling et al., 1994

Analiticamente, combinando l'equazione di Darcy con l'equazione di continuità, sotto le ipotesi di:

- $p(t) = \bar{p}$;
- $q(0) = 0$;
- $A(d) = \int_0^d w(x(d))dt$

si ottiene

$$h(d) = \frac{\bar{p} \cdot a(d)}{K_{sat} \sin \theta} = \frac{\bar{p}}{K_{sat}} QDWI$$

dalla quale, dall'integrazione con la condizione di criticità $FS=1$, risulta

$$p_{CR}(d) = \frac{T \sin \theta}{a(d)} \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi} \right)$$

Nuovamente, i punti aventi medesimo comportamento da un punto di vista morfologico risultano essere quelli caratterizzati dallo stesso periodo di ritorno, associato ad un certo valore di $p_{CR}(d)$.

Si riassumono in Tabella 2.1 i tratti distintivi dei modelli sopra citati.

Autori	Anno	Stato stazionario	Stato transitorio	a = costante	a = a(d)
O'Loughlin	1986	✓		✓	
Rosso et al.	2006		✓	✓	
Borga et al.	2002		✓		✓

Tabella 2.1: Evoluzione dei modelli idrologici fondati sull'elaborazione di indici

2.2.4 MODELLI DI DETTAGLIO PER LA VALUTAZIONE DELLE PRESSIONI INTERSTIZIALI

Per quanto riguarda la modellazione di dettaglio, la soluzione diretta dell'equazione di Richards può avvenire a differenti livelli di approssimazione.

Iverson (2002) modella lo scambio saturo-non saturo sotto le ipotesi di:

- Precipitazione di intensità e durata variabili;
- Flusso transitorio;
- Terreno quasi saturo;
- Condizioni iniziali e finali stazionarie;
- $K_{sat}(z) = \text{costante}$.

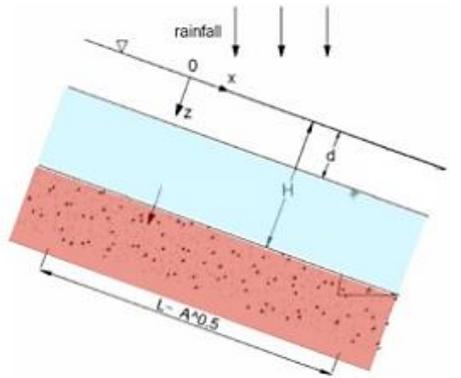


Figura 2.10: Schema di versante adottato nel modello di Iverson

A partire dall'equazione di Richards su versante piano:

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \theta \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \theta \right) \right]$$

dove $C(\psi)$ è la capacità idraulica del suolo [L^{-1}], vengono introdotte le seguenti semplificazioni:

- formulazione del problema in termini adimensionali (contrassegnati da un asterisco);
- definizione della struttura che la soluzione dovrà avere, del tipo:

$$\psi^* = [z^* - d^* (x^*, y^*, z^*)] \cos \theta + \psi_s^*$$

dove il primo termine fa riferimento alla soluzione idrostatica, asintotica e fornisce la posizione della *water table* d , il secondo alla soluzione transitoria (Cordano et al., 2008).

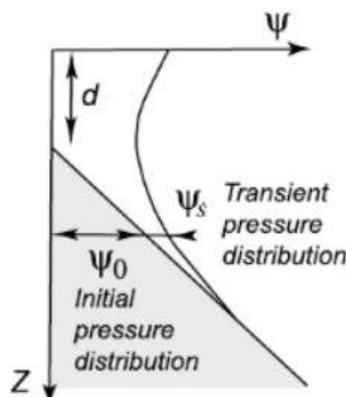


Figura 2.11: Distribuzione delle pressioni interstiziali secondo l'approccio di Iverson. FONTE: Iverson, 2000

Sostituendo la forma della soluzione nell'equazione di Richards scritta in termini adimensionali si ottengono due equazioni, rispettivamente a breve e lungo termine:

$$\begin{cases} \psi_s^* = \psi_{s0}^* + \varepsilon^2 \psi_{s1}^* + 0(\varepsilon^4) \\ d_s^* = d^* + \varepsilon^2 d_{s1}^* + 0(\varepsilon^4) \end{cases}$$

Il termine ε è il rapporto tra le scale temporali caratteristiche del processo di trasferimento delle pressioni dalla regione non satura a quella satura, definito come:

$$\varepsilon = \frac{T_S}{T_L}$$

essendo:

- $T_S = \frac{H^2}{D_0}$, tempo scala caratteristico del flusso verticale [T];
- $T_L = \frac{L^2}{D_0}$, tempo scala caratteristico del flusso laterale [T];
- $D_0 =$ Diffusività idraulica, definita come $K(\psi)/C(\psi)$ [L^2T^{-1}].

Si nota come, a rigore, la diffusività assunta per il flusso verticale, dunque nel non saturo, risulterebbe essere inferiore a quella assunta per il flusso laterale saturo; tuttavia questa incongruenza non si ripercuote sulla soluzione finale dal momento che, a lungo termine, è il flusso laterale a prevalere.

Assumendo $\varepsilon \ll 1$ (essendo l'estensione del suolo in lunghezza L molto maggiore della sua profondità), Iverson deriva due equazioni semplificate le quali descrivono, rispettivamente nello stato stazionario e in quello transitorio, la distribuzione delle pressioni nel mezzo non saturo.

In particolare, per lo stato transitorio Iverson ricava l'equazione di Richards lineare:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = D_0 C \alpha^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}$$

la cui soluzione, nota, si ottiene da un'operazione di convoluzione come rappresentato in Figura 2.12:

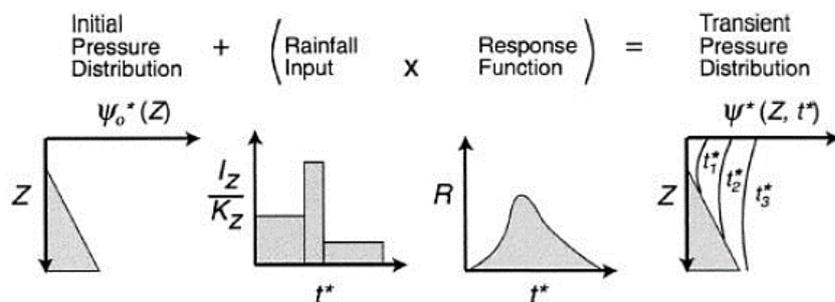


Figura 2.12: Schematizzazione della soluzione a breve termine ($t \ll L^2/D_0$). FONTE: Iverson, 2000

I tre grafici rappresentano, da sinistra verso destra, la distribuzione iniziale idrostatica, la precipitazione in input e la funzione di risposta, ovvero la soluzione all'equazione di Richards monodimensionale per un impulso istantaneo.

Una successiva evoluzione delle equazioni implementate nel modello di Iverson è rappresentata dal modello numerico TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability*) (Baum et al., 2008), di cui esistono due versioni: nella prima (TRIGRS 1.0, 2002)

vale l'ipotesi di completa saturazione del terreno, mentre la successiva (TRIGRS 2.0, 2008) costituisce il primo modello che consente di riprodurre l'infiltrazione transitoria nel non saturo, insieme alla propagazione diffusiva di onde di pressione nel saturo.

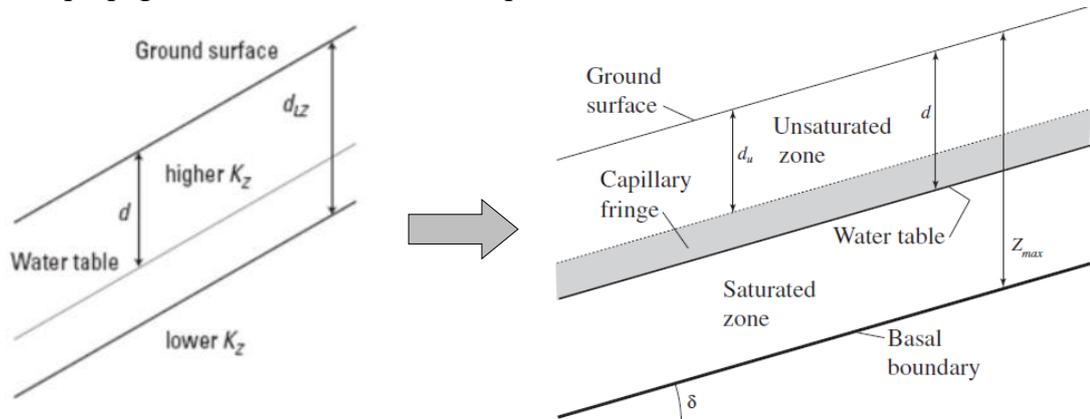


Figura 2.13: schema di versante implementato nelle versioni TRIGRS 1.0 (a sinistra) e TRIGRS 2.0 (a destra). FONTE: Baum et al., 2002, 2008

Qualitativamente l'effetto indotto dalla regione insatura a seguito di un evento piovoso si traduce, inizialmente, in un'azione ritardante sulla propagazione del fronte di infiltrazione, a cui segue l'innalzamento della tavola d'acqua rispetto alla sua posizione iniziale. Ciò innesca un'onda di pressione diffusiva che si propaga verso il basso.

Baum et al. utilizzano la soluzione in forma chiusa per l'equazione di Richards linearizzata fornita da Iverson nel caso di strato permeabile di spessore infinito, estendendola al caso in cui il contorno impermeabile si trovi ad una profondità finita d_b .

Per una pioggia di Intensità I_z e durata t_{end} , l'espressione della pressione neutra lungo la coordinata verticale è fornita da:

$$\psi(d_b, t) = \begin{cases} (d_b - d_w)\beta + 4 \left(\frac{I_z}{K_z} \right) S(d_b, t), & \text{se } t \leq t_{end} \\ (d_b - d_w)\beta + 4 \left(\frac{I_z}{K_z} \right) [S(d_b, t) - S(d_b, t - t_{end})], & \text{se } t > t_{end} \end{cases}$$

essendo

$$S(d_b, \tau) = \sqrt{D\tau} \sum_{m=1}^{\infty} ierfc \left[\frac{(2m-1)d_b}{2\sqrt{D\tau}} \right]$$

$$ierfc(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) - x \operatorname{erfc}(x)$$

dove

- $\operatorname{erfc}(x)$ è la funzione complementare degli errori;
- d_w è la profondità della superficie piezometrica iniziale [L];
- K_z è la permeabilità in direzione z [LT^{-1}];
- D è la diffusività idraulica [L^2T^{-1}].

L'istante t_p in cui ψ raggiunge il valore di picco in corrispondenza della superficie di

scorrimento rappresenta la condizione più critica in termini di stabilità del pendio e si ottiene massimizzando l'espressione fornita dalla precedente equazione; l'espressione algebrica così ottenuta va risolta numericamente nell'incognita t_p .

L'ultimo step di complessità è rappresentato dalla soluzione diretta dell'equazione di Richards tridimensionale, la quale fornisce infine una descrizione completa del campo di pressione in un suolo parzialmente saturo, consentendo la rimozione delle semplificazioni assunte dai modelli finora indagati.

A tal proposito il modello GEOtop (Rigon et al., 2006) è composto da un solutore 3D per l'analisi del ciclo idrologico completo e da un modulo di stabilità, GEOtop-FS, in cui il fattore di sicurezza è stimato con un approccio probabilistico, assegnando una distribuzione di probabilità ai parametri che descrivono le caratteristiche del suolo. Tale scelta è motivata dall'incertezza che caratterizza i parametri aventi un ruolo determinante nei processi di innesco, pertanto ciascuno di essi viene considerato come variabile aleatoria, alla quale sono associate una media e una varianza stimate a partire dai dati disponibili.

Viene poi impiegato il metodo dell'Equilibrio Limite su Pendio Indefinito, opportunamente modificato per tener conto della copertura vegetale, sia in termini di sovraccarico dovuto al peso della vegetazione, sia in termini di incremento della coesione esercitata dagli apparati radicali.

Per quanto riguarda la componente idrologica, GEOtop simula il bilancio di massa e di energia del bacino interessato dall'analisi, permettendo la riproduzione di fenomeni quali l'evapotraspirazione del suolo, la traspirazione della vegetazione, l'andamento della temperatura superficiale, la radiazione solare così come il bilancio di massa dei ghiacciai e l'interazione della falda con lo scioglimento. Una simile completezza permette di ricostruire le condizioni idrologiche che preludono ad un evento franoso a patto di caratterizzare il dominio di indagine in maniera dettagliata, considerato l'elevato numero di parametri coinvolti nella modellazione.

Si riporta in Figura 2.14 uno schema di flusso conclusivo che ripercorre l'elaborazione e i fenomeni fisici modellati da ciascun approccio.

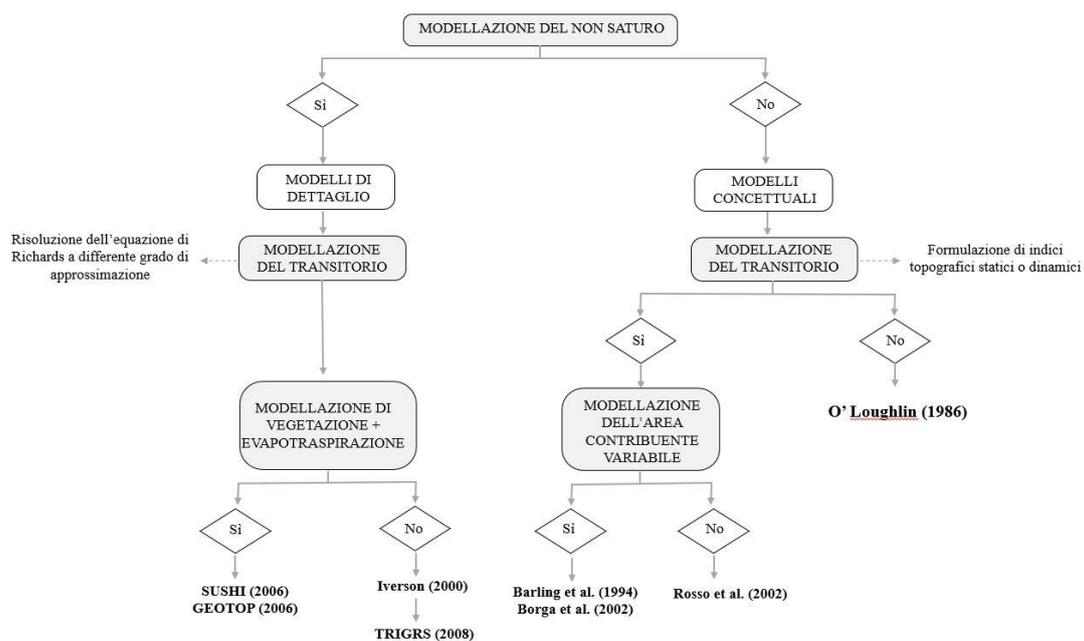


Figura 2.14: Flow chart riassuntivo dei contributi metodologici indagati

3. CASO STUDIO: L'EVENTO DEL 2-6 NOVEMBRE 1994

3.1 SCELTA DEL CASO STUDIO

Nell'ambito della presente tesi, ci si è innanzitutto concentrati sulla scelta di un caso studio che potesse rispondere alle seguenti necessità:

- L'intento di indagare versanti reali, svincolandosi dall'impiego di caratteristiche costruite ad hoc;
- La presenza di una documentazione sufficientemente ampia, insieme alla reperibilità di dati sia pluviometrici che di natura geotecnica;
- L'esemplificazione del ruolo delle discontinuità pedologiche legate alla realizzazione di percorsi stradali, tema su cui si focalizza la presente ricerca.

In merito al punto c., si riporta quanto emerso dal Rapporto sulle frane in Italia 78/2007, relativamente all'analisi del dissesto nella regione Piemonte: l'aliquota maggiore dei fenomeni franosi si realizza ai danni di strade, dato caratteristico di versanti particolarmente acclivi.

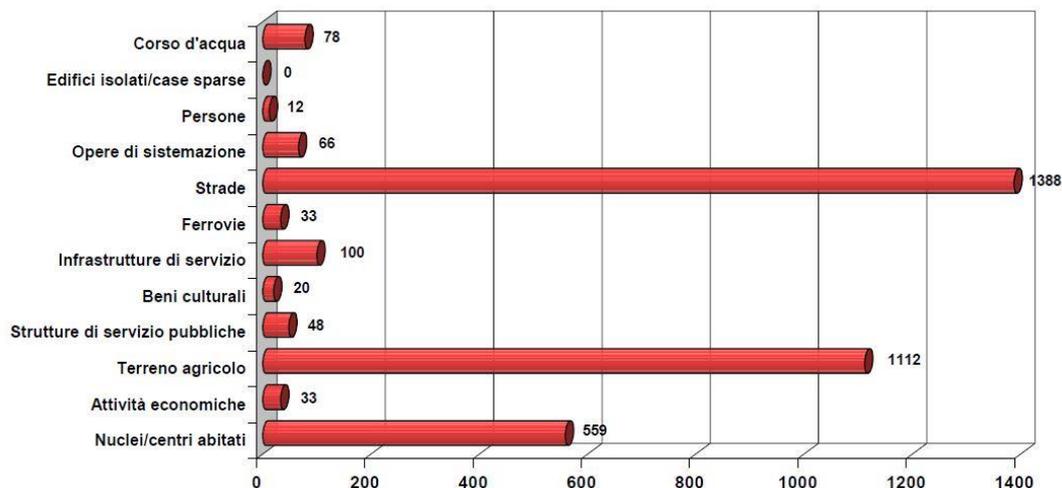


Figura 3.1: Numero di frane per tipologia di danno. FONTE: L'analisi del dissesto in Piemonte. In: Rapporto sulle frane di Italia, 78/2007

Numerose sono le fonti bibliografiche nelle quali viene evidenziato il ruolo svolto dalla presenza di tagli di origine antropica come fattore d'innescio al distacco (Borga et al., 2004; Cascini et al., 2008; Guadagno et al., 2002; Mele et al., 2005).

In particolare, Guadagno e Revellino (2002) realizzano un'analisi statistica dei fattori predisponenti all'innescio relativamente agli eventi di Sarno e Quindici del maggio 1998, concludendo che il 44% dei distacchi analizzati nella regione del Pizzo d'Alvano risulta essere legata alla presenza di tagli stradali e scarpate, verificandosi in molti casi ad una distanza inferiore ai 10 metri. In maniera analoga Cascini (2008) riconosce che il 16% delle 133 frane analizzate sono state caratterizzate dalla presenza di sentieri di montagna lungo il versante alle spalle dell'abitato di Quindici, risultato accompagnato da una modellazione agli elementi finiti. E ancora Mele et al. (2005) simulano il comportamento del flusso idrico all'interno del suolo mediante un codice bidimensionale agli elementi finiti, in modo da evidenziare l'andamento della tavola d'acqua in corrispondenza della discontinuità.

3.2 DESCRIZIONE DELL'EVENTO

Nei giorni 5 e 6 novembre 1994 il basso Piemonte e in particolare le province di Cuneo, Asti e Alessandria furono pesantemente colpite da un violento evento alluvionale che causò l'esondazione dei fiumi Po, Tanaro e molti loro affluenti, in particolare il torrente Belbo. Contestualmente, ebbe luogo l'attivazione di numerosissimi processi di instabilità di versante, particolarmente concentrati sulla parte alta dei bacini di Tanaro (ad eccezione del sottobacino della Stura di Demonte), Belbo e Bormida.

Campo di indagine del presente lavoro di tesi è costituito dalla regione collinare delle Langhe, individuata in Figura 3.2.

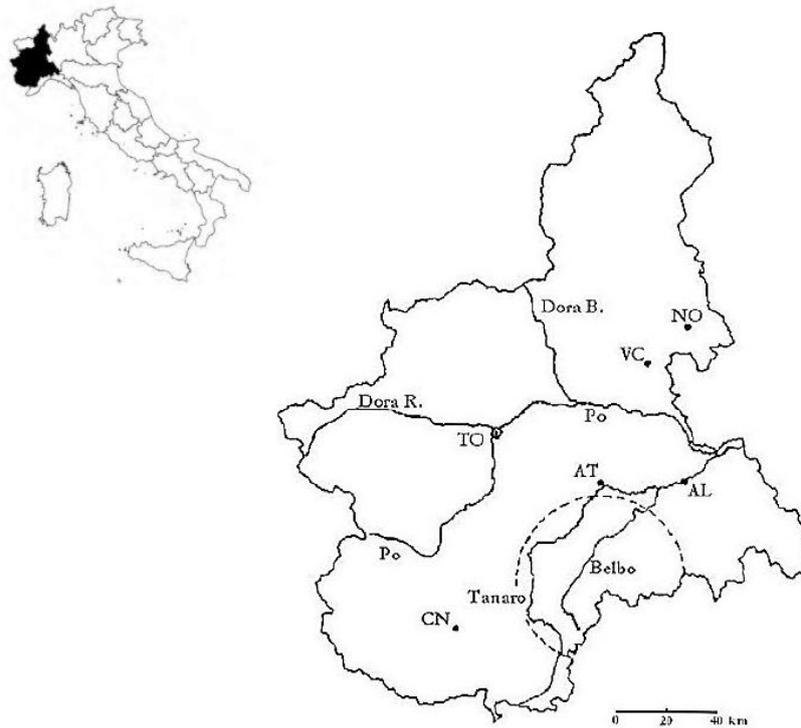


Figura 3.2: Inquadramento geografico delle Langhe. FONTE: *Processi di instabilità sui versanti*, in: *Eventi alluvionali in Piemonte*, Regione Piemonte, Torino, 1998

Dall'analisi dei dati pluviometrici rilevati dalle stazioni della rete regionale, le precipitazioni hanno avuto inizio il giorno 2 novembre, caratterizzate da continuità e modesta intensità fino ai giorni 3-4 novembre. Nella serata del giorno 4 si registra un repentino incremento ed è durante la notte, tra le ore 2.30 e le 7.30 del mattino del giorno 5 che si rilevano i primi distacchi, fino ad arrivare al giorno 6 novembre, quando l'evento può considerarsi sostanzialmente esaurito nella fascia meridionale della regione.

Le piogge cadute durante l'evento hanno avuto un carattere di eccezionalità, collocandosi tra i massimi storici degli ultimi decenni (*Barbero et al.*, 1998). Si riportano in Tabella 3.1 i totali giornalieri di precipitazione sul bacino del Tanaro.

N°	Stazione	02-nov	03-nov	04-nov	05-nov	06-nov	07-nov	P _{tot} [mm]
1	Piaggia	0	11	16,6	60	124	10,8	222,4
2	Frabosa Fontane	0	15	50,1	50,1	135,2	9	259,4
3	Corsagliola	0	6,2	14,6	130	93,8	10,8	255,4
4	Mondovì	0	7,6	4,4	38,2	98,8	15,4	164,4
5	Certosa Pesio	0	6,4	14,4	51,4	77,8	14,2	164,2
6	Breolungi	0	7,8	4	34,4	77,6	10	133,8
7	Rio Freddo	0	11	17,8	32,8	54,6	10,4	126,6
8	Demonte - C.le	0	5,4	8,8	33,8	47,2	11,2	106,4
9	Cuneo	0	5,4	4	32	37,6	16	95
10	Cuneo	0	7	4,8	34,2	47,4	19,2	112,6
11	Fossano	0	8,6	4,2	27,2	54	13,4	107,4
12	Entracque - Diga	0	8,2	11,8	41,2	53	9,6	123,8
13	Borgo S. Dalmazzo	0	5,2	5,8	35,2	66,6	21,2	134
14	Dogliani	0	10,4	10,6	58,4	141,8	11,6	232,8
15	Farigliano	0	10	7,8	56	133,2	11,2	218,2
16	Bra	0	12,2	6,4	43	96	10	167,6
17	Alba	0	11,4	5	54,8	174,2	5,8	251,2
18	Alba-Mussotto	0	13,8	6	55,2	174	3,8	252,8
19	Alba-Vaccheria	0	14,4	7,2	55,8	198,4	7,6	283,4
20	Verduno	0	13,4	5,6	41	130,6	6,8	197,4
21	La Morra	0	14	7	52,2	91,8	9,6	174,6
22	La Morra - Annunziata	0	12,4	7,2	44,8	110,8	8,6	183,8
23	Diano d'Alba	0	11,6	9,6	50,2	194,6	11,4	277,4
24	Rodello	0	12,6	10,8	63,8	243,4	8,8	339,4
25	Govone	0	2,4	0,4	54	101,8	0,4	159
26	Sommariva Perno	0	14,6	4,6	50,4	133	8,4	211
27	Corneliano	0	14	5,4	54	160,6	7,6	241,6
28	Monforte d'Alba	0	11,6	7,4	42,6	104,8	8,4	174,8
29	S. Vittoria d'Alba	0	13,4	6,2	46	116	8	189,6
30	Priocca	0	13,8	7,6	47,6	160	9,2	238,2
31	Castagnito- S. Giuseppe	0	13	7	65	171	6,8	262,8
32	Guarene	0	14,6	8	61,6	191,8	6,2	282,2
33	Magliano Alfieri	0	15,2	9	67	161,6	6,6	259,4
34	Castellinaldo	0	13,2	6,8	50	164,8	10	244,8
35	Castelnuovo - Colle D. Bosco	0	10,6	7	56	93,2	23	189,8
36	Albugnano-Vezzolano	0	11,6	18,6	68	92	9	199,2
37	S. Damiano d'Asti	0	9,4	7,4	59,6	138	13	227,4
38	Castell'Alfero	0	14	5,6	42,8	45	17	124,4
39	Castino	0	10	5,8	110,4	82,4	4,4	213
40	Canelli	0	12,4	9	69,4	27	9	126,8
41	Cossano Belbo	0	10,8	8	117,6	80,8	5,6	222,8
42	S. Libera	0	1,6	2	79,4	35,2	1,6	119,8
43	Millesimo	0	18	15	97	175	6,6	311,6
44	Cairo Montenotte	0,2	15	13	167,8	103,8	16,4	316,2
45	Spigno Monferrato	0,2	12,8	12,2	100	47,2	4	176,4
46	Mombaruzzo	1	10,8	15,2	78	28	9,2	142,2
47	Castel Rocchero	1	11	15,4	51,8	28	7	114,2
48	Alice Bel Colle	1,4	15	11,2	73,4	31	5	137
49	Ricaldone	5	19,6	20,6	108,4	26,2	7	186,8
50	Montaldo Bormida	2,2	13,8	14,6	73,4	26,4	4,4	134,8
51	Acqui Terme - Mombarone	1,6	11,8	12	73,8	28,2	5	132,4
52	Sezzadio	1,8	13,2	17	70,4	23,4	4,4	130,2
53	Roccamare	3,6	24	19,8	129	39	6	221,4
54	Castelletto d'Orba	3,4	20,2	20,8	104,8	23	6,2	178,4
55	Ovada	0,8	10,8	10,4	129,8	24,4	0	176,2
56	Lavezzo - Lago	10,6	32,2	29	159,4	59,2	10,8	301,2
57	Lavagnina - Lago	10,8	32,6	28	185,6	52,2	8,2	317,4
58	Lavagnina - C.le	14,8	37,4	34,8	221,6	51,2	11,4	371,2
59	Tortona	2,6	10,2	10,6	39,6	23,6	10	96,6
60	Cassano Spinola	4	17	18	42	18	11	110
61	Montemarzino	3	10	7,8	41,2	24	12,6	98,6
62	Sale	0,4	17,4	22,6	30	29,8	3	103,2

Tabella 3.1: Precipitazioni totali giornaliere sul bacino del Tanaro

3.3 CARATTERIZZAZIONE DELL'AREA DI INDAGINE

Il quadro geologico nel settore collinare delle Langhe risulta essere piuttosto eterogeneo, caratterizzato da una complessa distribuzione delle facies, da notevoli variazioni in termini di spessori delle successioni e di composizione dei litotipi predominanti.

Quattro sono i gruppi prevalenti:

- Gruppo A: alternanze ritmiche con prevalenza dei litotipi arenaceo-marnosi o calcareo-marnosi, caratterizzati da una limitata permeabilità primaria e dalla tendenza degli strati marnosi ad imbibirsi in caso di precipitazione fungendo da piano di scivolamento. L'infiltrazione è ancor più ostacolata dalla presenza di una coltre eluvio-colluviale a prevalente matrice fine;
- Gruppo B: marne ed argilliti fortemente erodibili, aventi una permeabilità pressoché nulla (è possibile lo sviluppo di una permeabilità secondaria nelle aree fortemente fratturate);
- Gruppo C: rocce incoerenti di svariata origine, presenti per lo più nei fondovalle o nelle piane alluvionali dei principali fiumi;
- Gruppo D: alluvioni sabbiose o argillose, ad elevata erodibilità, la cui presenza è limitata ad alcune porzioni della valle alluvionale del Tanaro.

La stratigrafia facente capo al gruppo A risulta nettamente prevalente e caratterizzata da una giacitura isoclinale immergente verso NW, con un'inclinazione variabile tra 8° e 15°.

L'analisi della vasta bibliografia disponibile conferma che i processi di instabilità delle Langhe sono principalmente di due tipologie: frane per saturazione e fluidificazione delle coltri superficiali, descritte nel paragrafo 2.1, e scorrimenti planari.

A differenza di quanto accade per i fenomeni di *shallow landslides*, questi ultimi sono caratterizzati da dimensioni notevoli, dell'ordine dell'ettaro con spessori variabili tra qualche metro e oltre 15 m; interessano tipicamente versanti poco acclivi, con inclinazioni variabili intorno ai 10°-12°, e sono contraddistinti da accertata ripetitività sia in termini temporali che spaziali, con riattivazioni su versanti già interessati da fenomeni analoghi.

Gli scivolamenti planari sono inoltre caratterizzati dall'esistenza di segni premonitori che ne consentono in qualche modo il riconoscimento: il cinematismo ha inizio con l'apertura di fessure sub rettilinee, la cui densità aumenta nel tempo, in maniera più o meno rapida, fino al verificarsi del movimento vero e proprio, dunque la fase di traslazione.

Grazie ad una campagna di indagine condotta nell'estate del 1996 dalla Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione della Regione Piemonte, in collaborazione con CNR_IRPI di Torino, è stato possibile provvedere alla caratterizzazione dei fenomeni di dissesto verificatisi durante l'evento indagato, delimitando innanzitutto le geometrie di frana, accompagnata da un'indagine più dettagliata riguardo:

- le caratteristiche della zona di innesco (contesto morfologico, uso del suolo, parametri morfometrici)
- l'ora del distacco;
- i danni rilevati.

Per quanto riguarda le caratteristiche morfologiche del tratto in frana sono state individuate 4 casistiche (Figura 3.3):

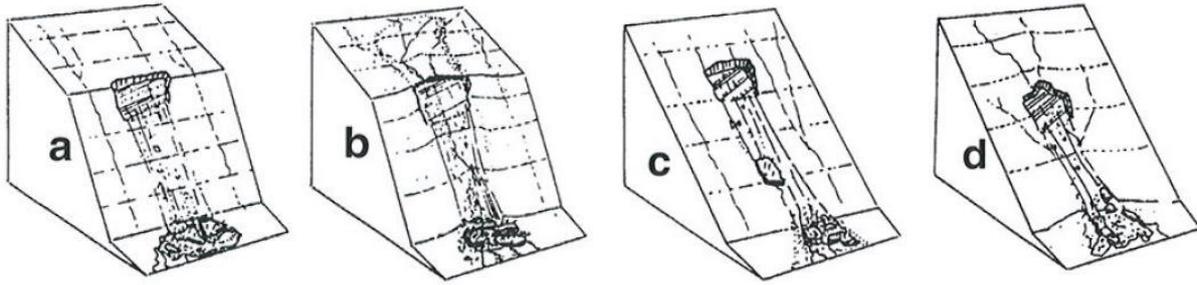


Figura 3.3: Casistica dei differenti contesti geomorfici nella localizzazione delle nicchie di frana. FONTE: Campus et al., 1998

- a. Pendio piano caratterizzato da una significativa variazione di pendenza; la zona di innesco si colloca a valle del tratto meno acclive.
- b. Pendio caratterizzato da una debole concavità e variazione di pendenza; la nicchia di distacco si colloca a valle del tratto meno acclive;
- c. Pendio continuo;
- d. Pendio continuo con concavità generalizzata.

Si può notare come il tratto sub-orizzontale dello schema a) sia riconducibile alla presenza di un piano stradale, condizione nella quale ricade circa l'80% dei casi considerati.

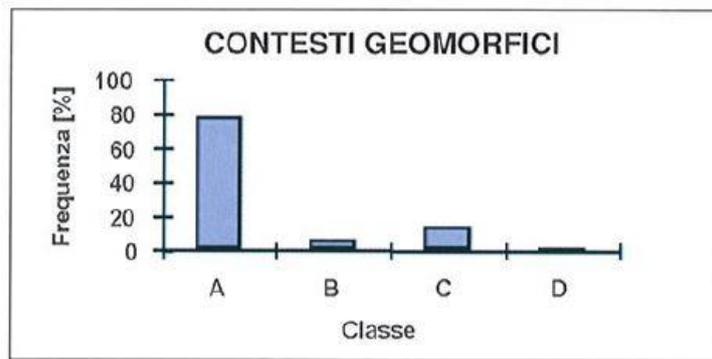


Figura 3.4: Distribuzione percentuale dei 4 casi individuati. FONTE: Campus et al., 1998

Il risultato dell'indagine descritta è stata la produzione un campione di 234 distacchi osservati.

In una prima fase di lavoro sono stati analizzati tali dati, parallelamente alla consultazione del database SIFRAP (Sistema Informativo Frane in Piemonte) mediante il software QGIS.

Esso rappresenta l'implementazione in rete tramite servizio WebGIS del progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) realizzata da ARPA Piemonte e, più nello specifico, del primo livello di approfondimento previsto dall'IFFI, il quale comprende il rilevamento delle informazioni di base, quali la definizione della geometria, della tipologia e dello stato di attività dei fenomeni franosi.

Il dataset si compone dei seguenti layer:

- I. Fenomeni Franosi di varia tipologia, quali:
 - frane poligonali: fenomeni cartografabili alla scala di rilevamento;
 - frane lineari: fenomeni di forma molto allungata, la cui larghezza non è rappresentabile alla scala di rilevamento ma la cui lunghezza è significativa e cartografabile;
 - frane puntuali: fenomeni di limitata estensione non cartografabili alla scala di rilevamento;
- II. Frane superficiali, suddivise nuovamente in:
 - frane areali;

– frane lineari.

In particolare, sono censite 457 frane superficiali lineari e 31970 frane superficiali areali, di cui 28882 relative all'evento 1994.

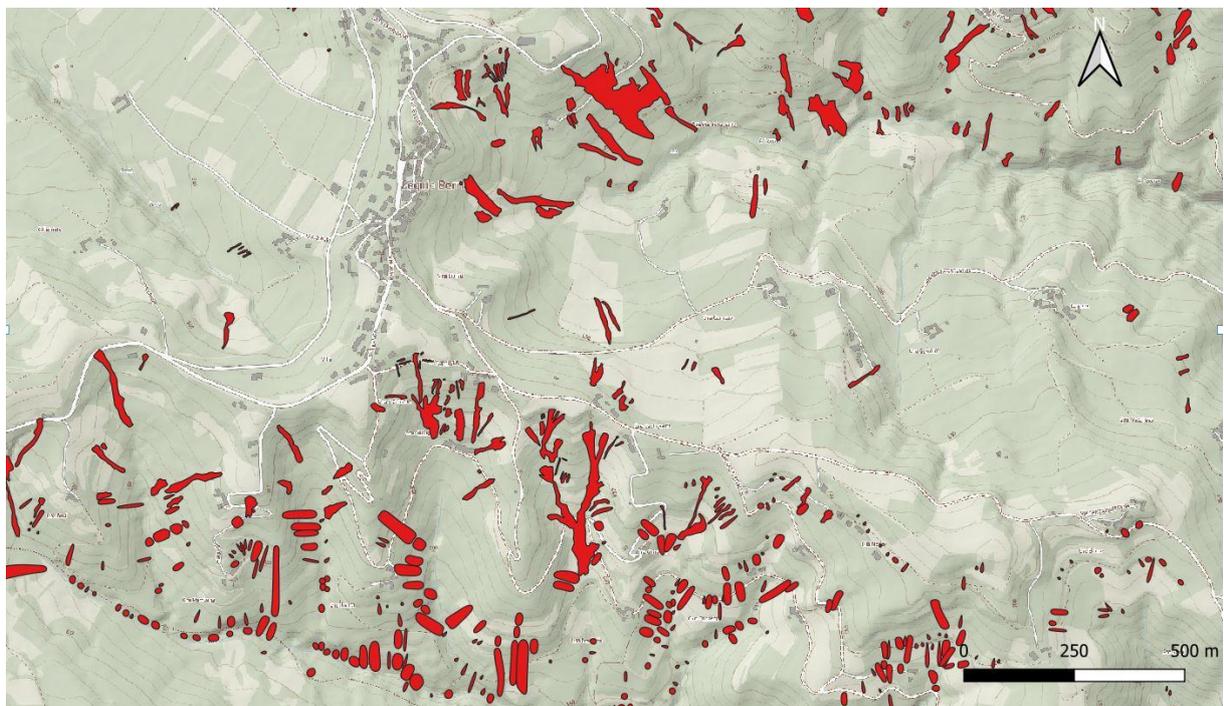
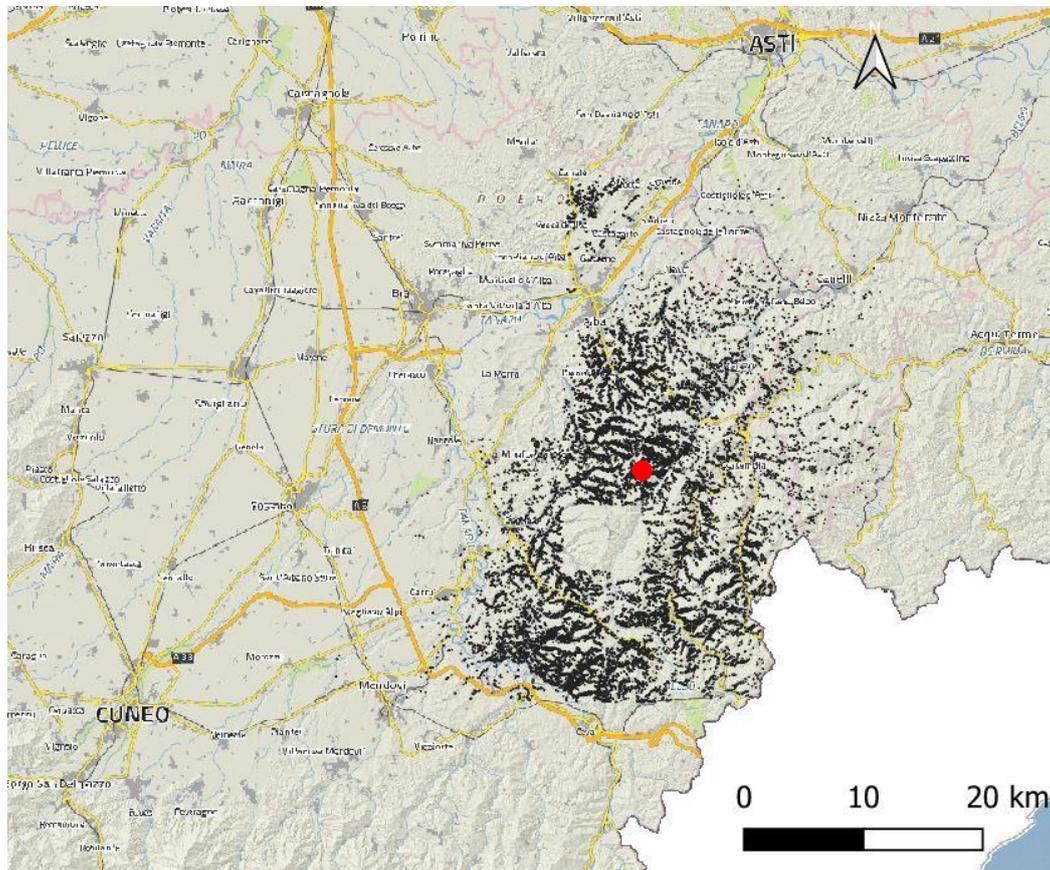


Figura 3.5: Distribuzione dei soil slips relativi all'evento 1994 nelle Langhe (in alto). Particolare del comune di Lequio Berria (in basso). FONTE: Database SIFRAP

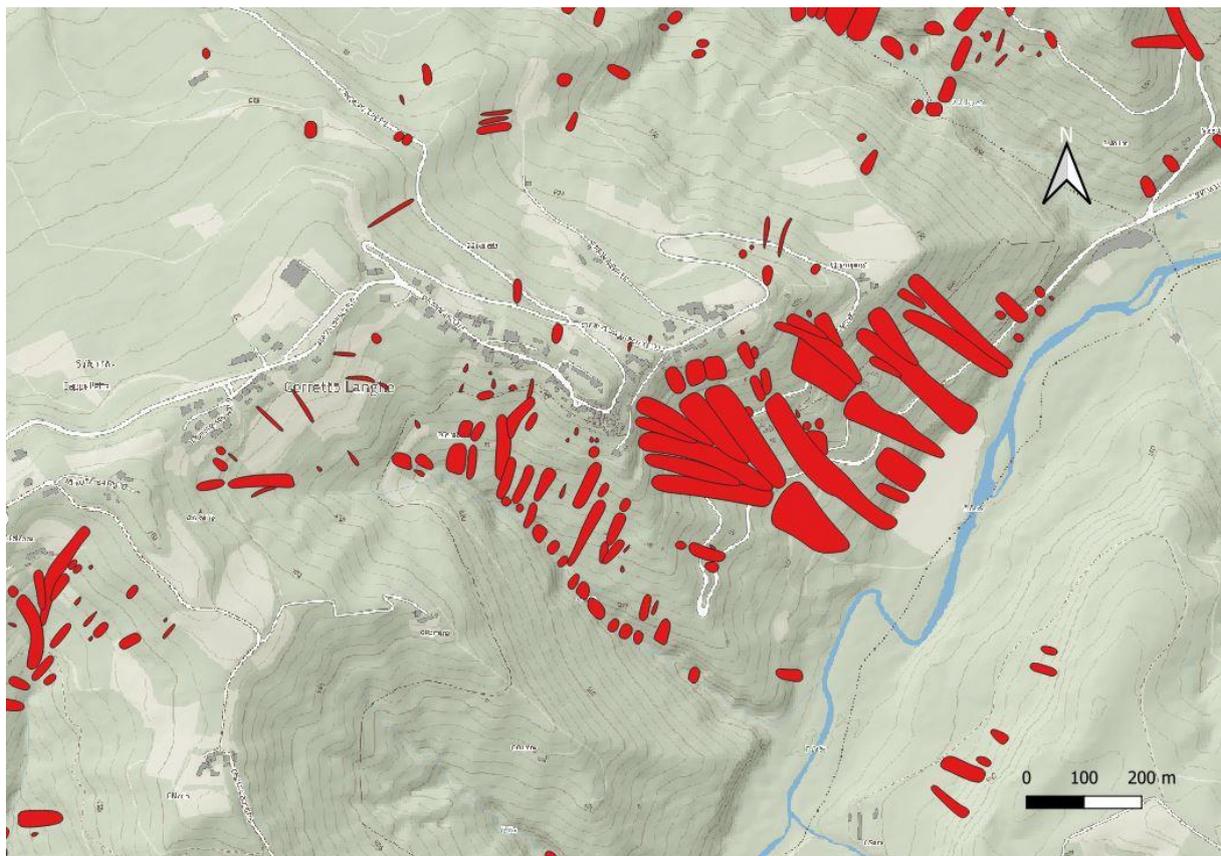
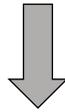
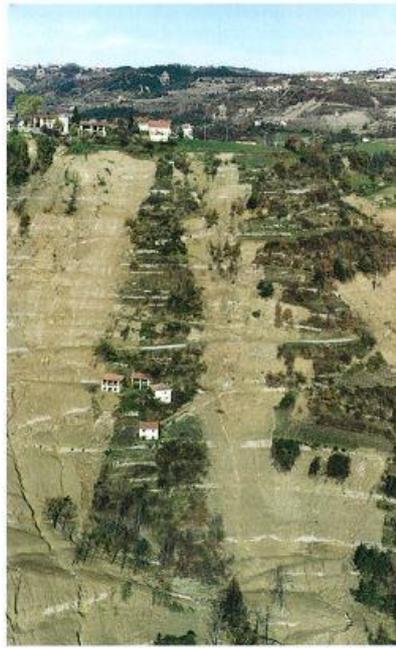


Figura 3.6: Ampio settore di versante coinvolto da fenomeni franosi nel comune di Cerretto Langhe (in alto). FONTE: Campus et al., 1998. Geometrie di tali distacchi riportate nel database SIFRAP. (in basso)

Le basi topografiche utilizzate nell'analisi sono costituite dalla Carta Tecnica Regionale, in formato multiscala, rappresentata in versione raster e riferita al sistema WGS84 UTM 32 nord, e il DTM della Regione Piemonte con risoluzione della griglia 5 metri, ottenuto da ripresa aerea 2009-2011, relativo ai fogli 192,193,210,211.

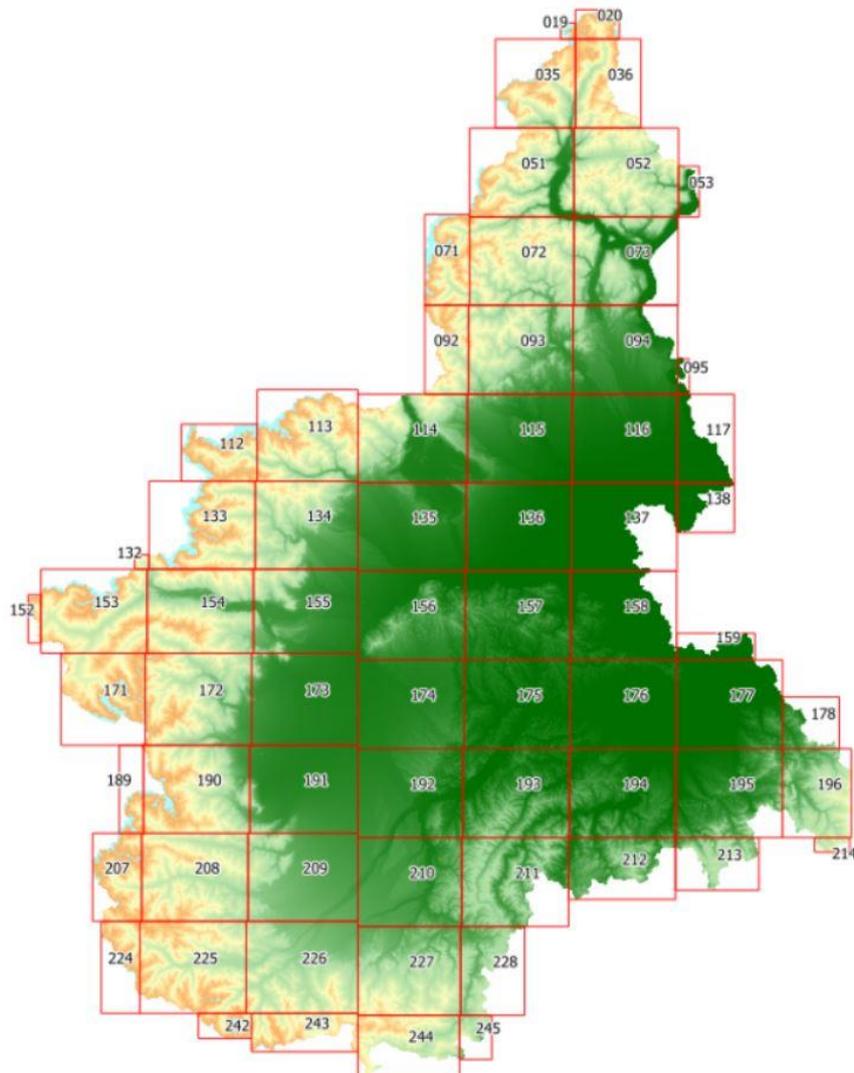


Figura 3.7: Griglia DTM Regione Piemonte. FONTE: Geoportale della Regione Piemonte. La griglia corrisponde circa al taglio dei fogli IGM 1:50.000

Si è inoltre ricercata documentazione di natura geotecnica, facendo riferimento alla banca dati Geotecnica di Arpa Piemonte, consultabile tramite il geoportale.

Il dataset comprende i punti di ubicazione dei fori di sondaggio geognostico e i punti di prelievo dei campioni di terreno, per i quali sono riportate informazioni anagrafiche e dati relativi ai risultati delle prove di laboratorio effettuate.

Tale operazione di filtrazione dei dati ha reso possibile la caratterizzazione di 13 distacchi, dunque di altrettanti versanti, di cui fossero disponibili i parametri pedologici, geotecnici e i dati pluviometrici, questi ultimi ricavati come descritto nel paragrafo 3.3.1.

Di 13, 8 fenomeni si sono verificati nelle immediate vicinanze o in corrispondenza di tratti in cui la continuità del versante è interrotta.

nome campo	descrizione	nome campo	descrizione
Perf_id	Codice Perforazione	Gid	progressivo
Perf_nome	Nome Perforazione	Camp_id	Codice Campione
Comune_nom	Comune	Camp_nome	Nome Campione
Comune_cod	Codice ISTAT	Perf_id	Codice Perforazione
Prov_sigla	Provincia	Perf_nome	Nome Perforazione
Perf_local	Località	Comune_nom	Comune
Chr10_codi	Sezione CTR	Comune_cod	Codice ISTAT
Chr10_nome	Nome Sezione CTR	Prov_sigla	Provincia
Data_inizi	Data Inizio Perforazione	Camp_local	Località
Data_fine	Data Fine Perforazione	Chr10_codi	Sezione CTR
Perf_canti	Cantiere	Chr10_nome	Nome Sezione CTR
Foge_descr	Descrizione	Foge_descr	Formazione Geologica
Perf_quota	Quota Piano Campagna (m slm)	Data_preli	Data Prelievo Campione
Perf_profo	Profondità Sondaggio (m)	Camp_profo	Profondità
Stra_livel	Livello Falda Freatica (m p.c.)	Cantiere	Cantiere
Perf_diam	Diametro perforazione (mm)	Tpre_descr	Tipo Prelievo
Perf_diamr	Diametro Rivestimento (mm)	Grdi_descr	Grado di Disturbo
Perf_incli	Inclinazione (°)	Tico_descr	Campionatore
Tepe_descr	Tecnica di Perforazione	Tica_descr	Tipologia Campione
Tima_descr	Tipo Materiale	Angr_peso_	Peso Naturale (kn/m3)
Tipe_descr	Tipo di Perforazione	Angr_pes_1	Peso Secco (kn/m3)
Perf_tipos	Tipo Sonda	Angr_pes_2	Peso Specifico Grani (kn/m3)
Ufte_descr	Utensile	Angr_perc_	Ciottoli (%)
Num_campio	Numero di Campioni	Angr_per_1	Ghiaia (%)
Link_spt	Prova SPT	Angr_per_2	Sabbia (%)
Link_perme	Permeabilità	Angr_per_3	Limo (%)
Link_campi	Campioni	Angr_per_4	Argilla (%)
Link_immag	Immagini	Angr_passa	Percentuale Passante Vaglio 200
Link_strat	Stratigrafia Semplicata	Angr_cont	Contenuto in Acqua (%)
Link_nspt	NSPT	Angr_limit	Limite Liquido (%)
		Angr_lim_1	Limite Plastico (%)
		Angr_indic	Indice Plastico (%)
		Link_prova	Prova Edometrica
		Link_curva	Curva Granulometrica
		Link_pro_1	Taglio Diretto a 1 Ciclo
		Link_pro_2	Taglio Diretto a N Cicli
		Link_perfo	Perforazione

Figura 3.8: Struttura dati e decodifica shapefile perforazioni (sinistra) e campioni (destra). FONTE: Dataset Banca Dati Geotecnica ARPA Piemonte, struttura dati

La distribuzione dei fori di sondaggio (in viola) e dei punti di prelievo dei campioni (in giallo) limitatamente alla regione delle Langhe è riportata in Figura 3.9:

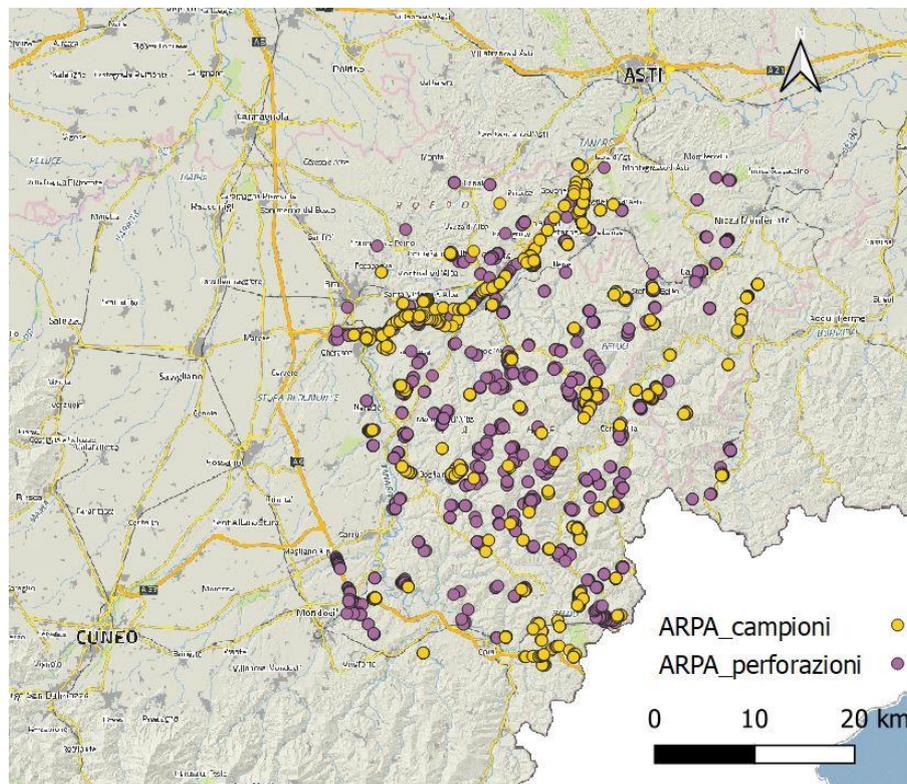
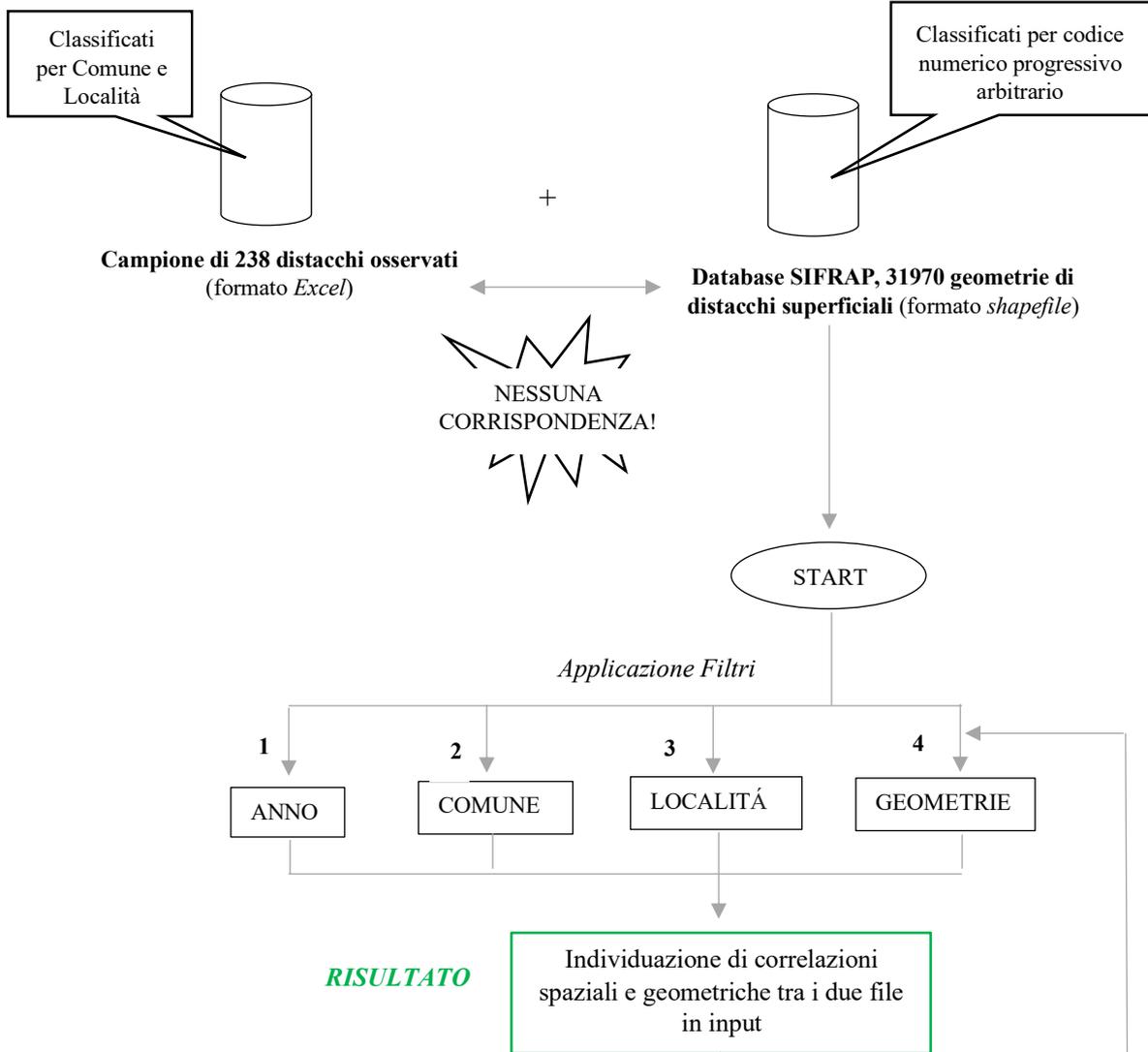
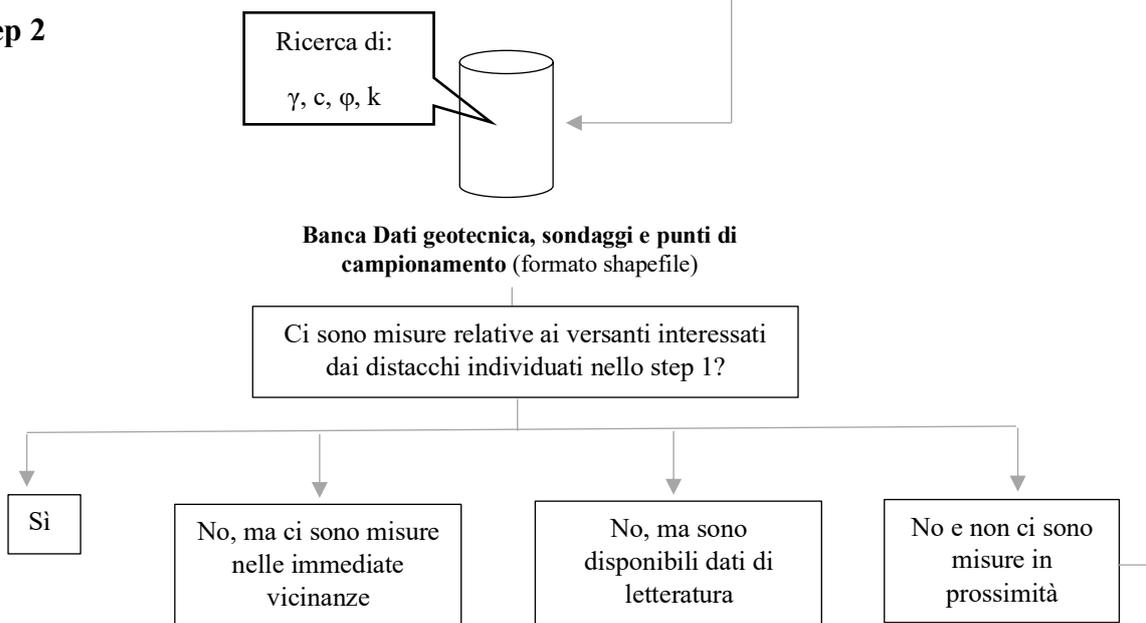


Figura 3.9: Distribuzione fori di sondaggio (in viola) e punti di prelievo campioni (in giallo) nelle Langhe

Step 1



Step 2



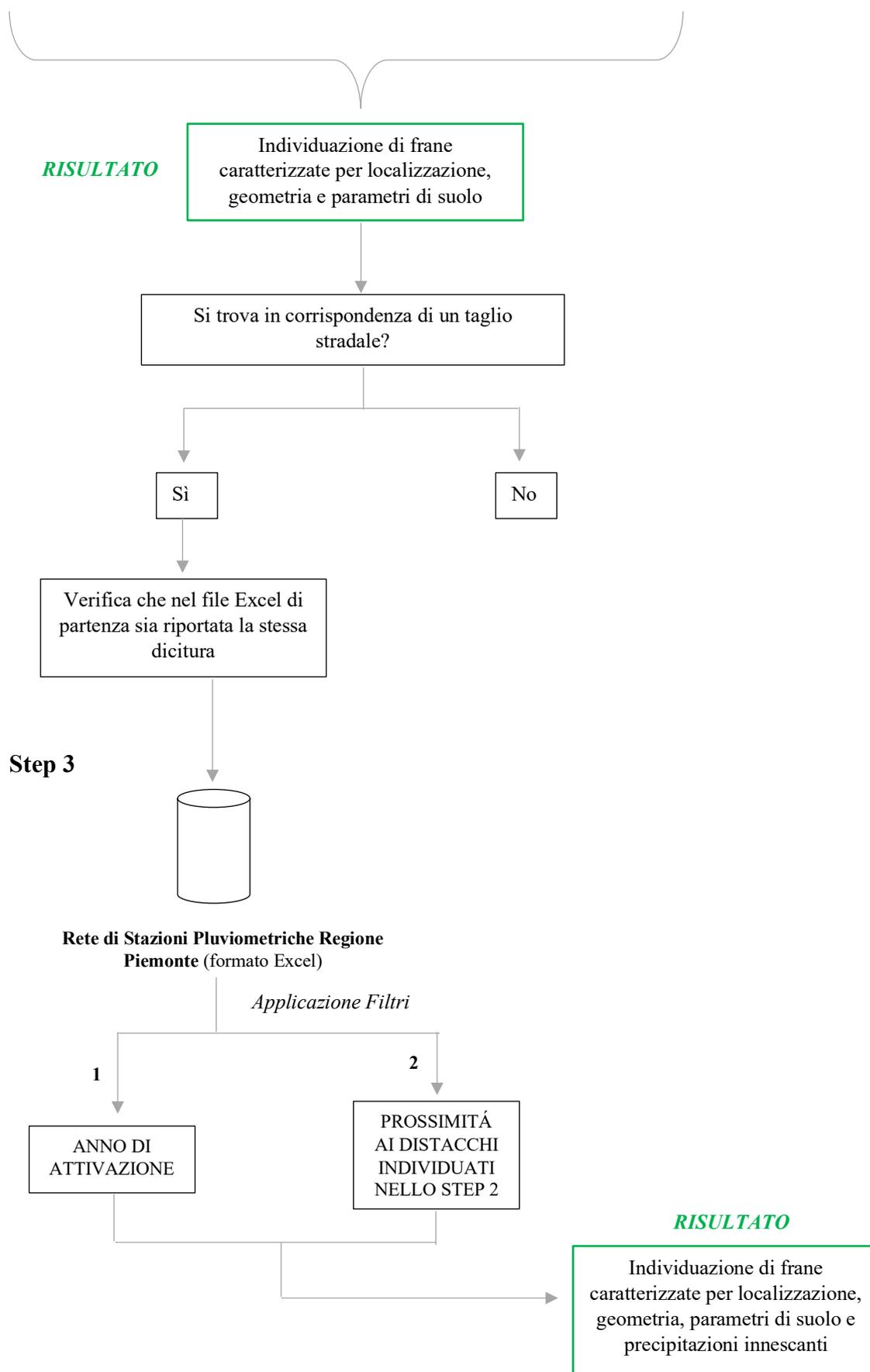


Figura 3.10: Flow Chart. Procedura di estrazione e caratterizzazione dei distacchi oggetto di studio

Si riportano nelle successive tabelle i risultati delle indagini condotte.

PENDIO CONTINUO					
COMUNE	Mombarcaro	Neviglie	Dogliani		Gottasecca
LOCALITÀ	C.na Battaglia	C. Tinella	Fraz. Martina		Villa
n°	1	2	3	4	5
PROVINCIA	CN	CN	CN	CN	CN
PESO SECCO [KN/m ³]	14,8	15,02	15,8	15,8	14,6
PESO SPECIFICO GRANI [KN/m ³]	25	26,8	28,2	28,2	25,1
INDICE DEI VUOTI [-]	0,689	0,784	0,785	0,785	0,719
POROSITÀ [-]	0,4080	0,4396	0,4397	0,4397	0,418
PERMEABILITÀ [m/s]	2,39E-06	6,00E-07	3,80E-06	3,80E-06	4,00E-07
ϕ' piccolo [°]	29,9	29	24,5	24,5	26
c' piccolo [Kpa]	44,3	20,5	28,5	28,5	20
ϕ' residuo [°]	24,7	19,4	18,4	18,4	26
c' residuo [KPa]	0	0	0	0	0
PENDENZA DEL VERSANTE [°]	23	25	29	35	38
CONTESTO GEOMORFICO	A	C	C	C	C

Tabella 3.2: Caratterizzazione distacchi su pendio continuo

PENDIO CON DISCONTINUITÀ								
COMUNE	A MONTE/ A VALLE DI UN TAGLIO STRADALE				IN CORRISPONDENZA DI UN TAGLIO STRADALE			
	Murazzano		Rocchetta Belbo		Murazzano	Paroldo	Cortemilia	
LOCALITÀ	Bric. Berico		Pia		Rea	Costaricca	C.na Florin	
n°	6	7	8	9	10	11	12	13
PROVINCIA	CN		CN	CN	CN	CN	CN	CN
PESO SECCO [KN/m ³]	15,03	15,03	16,3	16,3	15,03	14,5	17,4	17,4
PESO SPECIFICO GRANI [KN/m ³]	26,3	26,3	27	27	26,3	26,3	27	27
INDICE DEI VUOTI [-]	0,750	0,750	0,656	0,656	0,750	0,814	0,552	0,552
POROSITÀ [-]	0,429	0,429	0,3963	0,3963	0,429	0,4487	0,3556	0,3556
PERMEABILITÀ [m/s]	1,90E-06	1,90E-06	1,50E-06	1,50E-06	1,90E-06	6,00E-05	1,90E-05	1,90E-05
ϕ' piccolo [°]	27	27	30,9	30,9	27	23,5	32,4	32,4
c' piccolo [Kpa]	0	0	52,4	52,5	0	24,8	13,6	13,6
ϕ' residuo [°]	23	23	22,7	22,7	23	17,4	26,9	26,9
c' residuo [KPa]	0	0	0	0	0	0	0	0
PENDENZA DEL VERSANTE [°]	24	23	35	36	23	24	35	34
CONTESTO GEOMORFICO	A	A	B	A	A	C	C	D

Tabella 3.3: Caratterizzazione distacchi su pendio con discontinuità topografica

I parametri geotecnici ed i valori di permeabilità saturata fanno riferimento a campioni di terreno prelevati tra i 2 e gli 8 metri di profondità, nel punto geograficamente più prossimo al versante in esame.

Nonostante la stratigrafia orizzontale dei terreni coinvolti risulti essere piuttosto articolata, la loro composizione granulometrica è da attribuirsi prevalentemente a limi, da sabbiosi fino a debolmente argillosi, e marne argilloso-siltose, più o meno compatte, con alternanze di livelli sabbioso-arenacei.

I valori di acclività dei versanti risultano compresi tra i 23 e i 38°.

n°	DIMENSIONI			
	Lunghezza	Larghezza	Spessore	Volume Coinvolto
	[m]	[m]	[m]	[m ³]
1	11,0	16,0	1,0	176,0
2	9,0	13,0	0,8	93,6
3	13,5	5,0	0,6	40,5
4	12,0	4,0	0,8	38,4
5	11,2	10,8	0,6	72,6
6	18,5	6,3	0,4	46,6
7	42,0	7,0	0,4	117,6
8	25,0	13,0	0,7	227,5
9	7,0	9,0	0,9	56,7
10	8,5	11,5	0,6	58,7
11	30,0	4,0	0,7	84,0
12	30,0	7,9	1,5	355,5
13	70,0	9,5	1,0	665,0

Tabella 3.4: Dimensioni dei distacchi oggetto di indagine

Si riportano infine le curve granulometriche caratteristiche dei terreni di ciascuna delle località interessate dai fenomeni indagati.

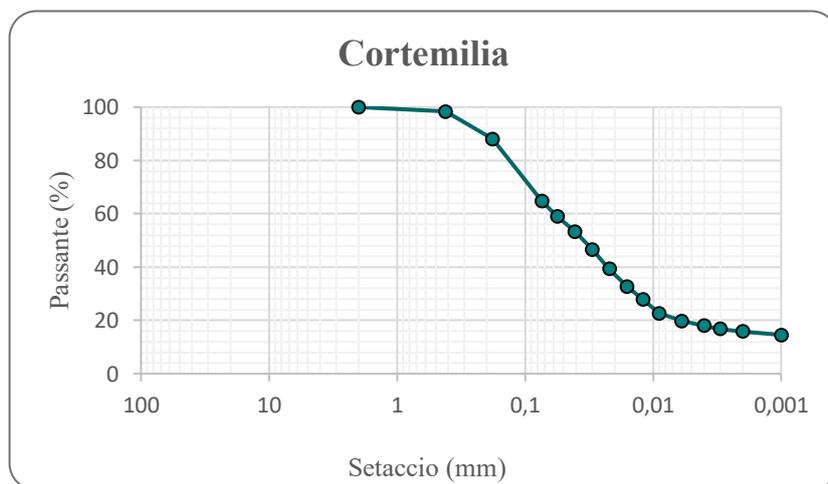


Figura 3.11: Curva granulometrica Cortemilia, località C.na Florin

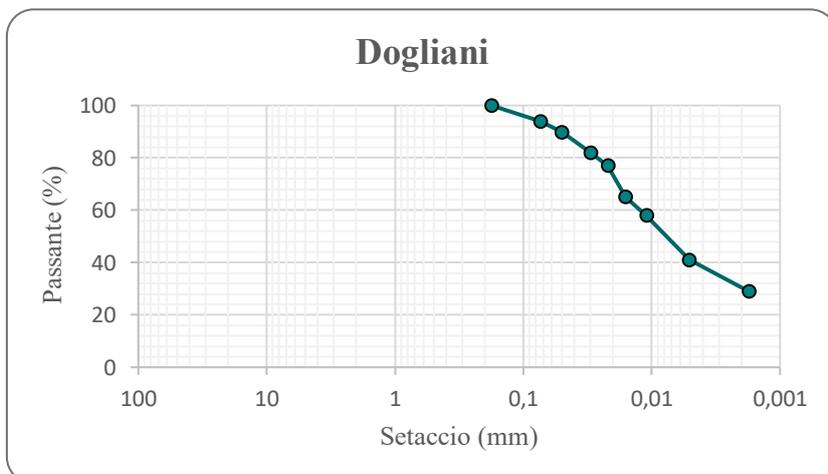


Figura 3.12: Curva granulometrica Dogliani, località Fraz. Martina

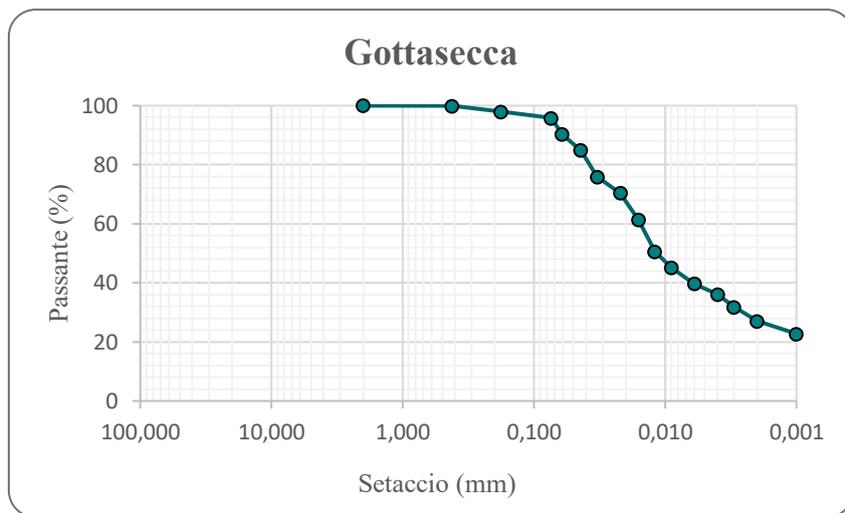


Figura 3.13: Curva granulometrica Gottasecca, località Villa

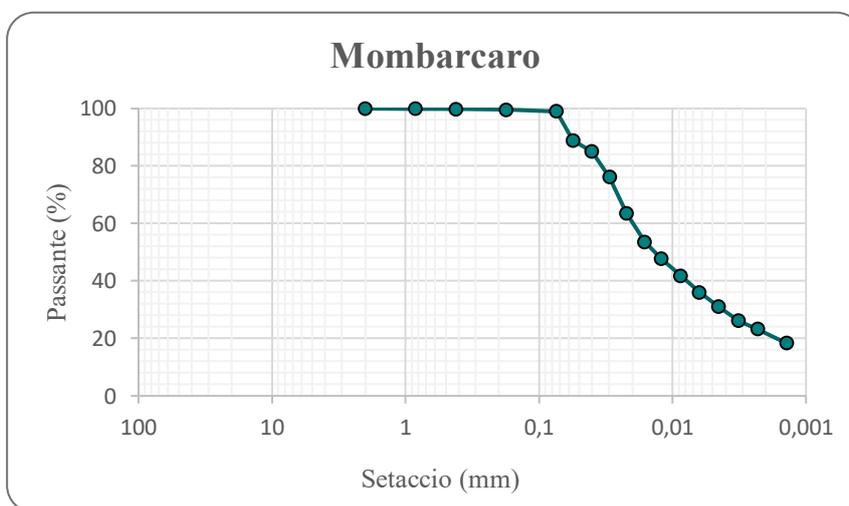


Figura 3.14: Curva granulometrica Mombarcaro, località C.na Battaglia

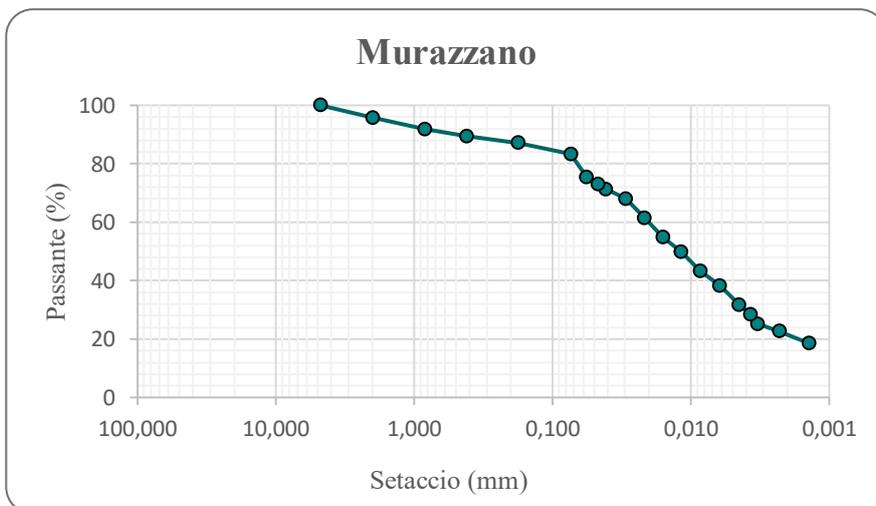


Figura 3.15: Curva granulometrica Murazzano, località Rea

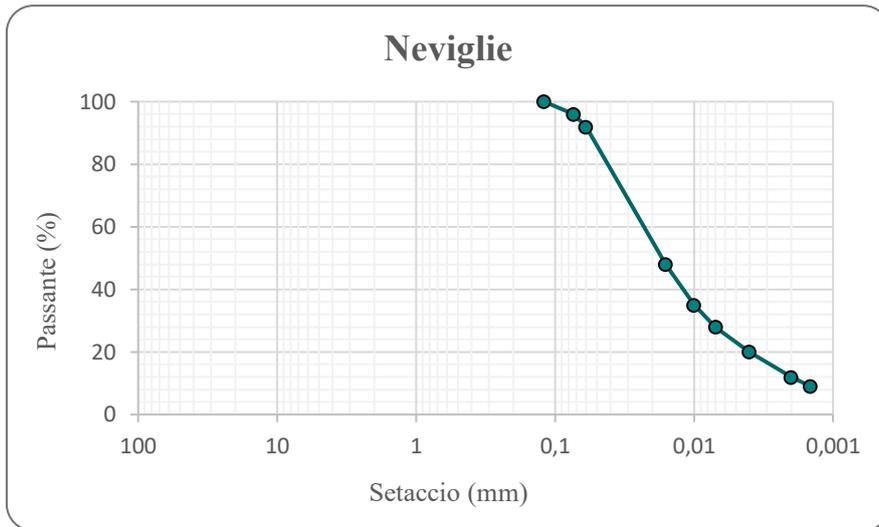


Figura 3.16: Curva granulometrica Neviglie, località C.Tinella

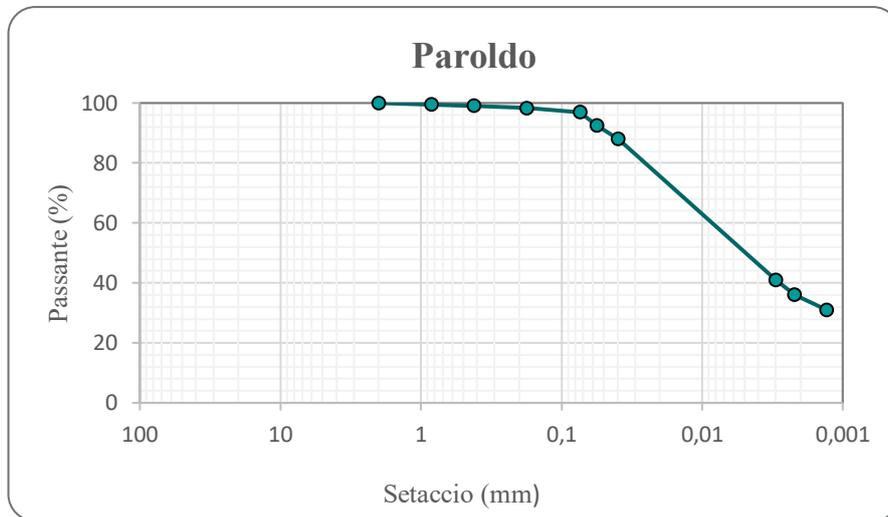


Figura 3.17: Curva granulometrica Paroldo, località Costaricca

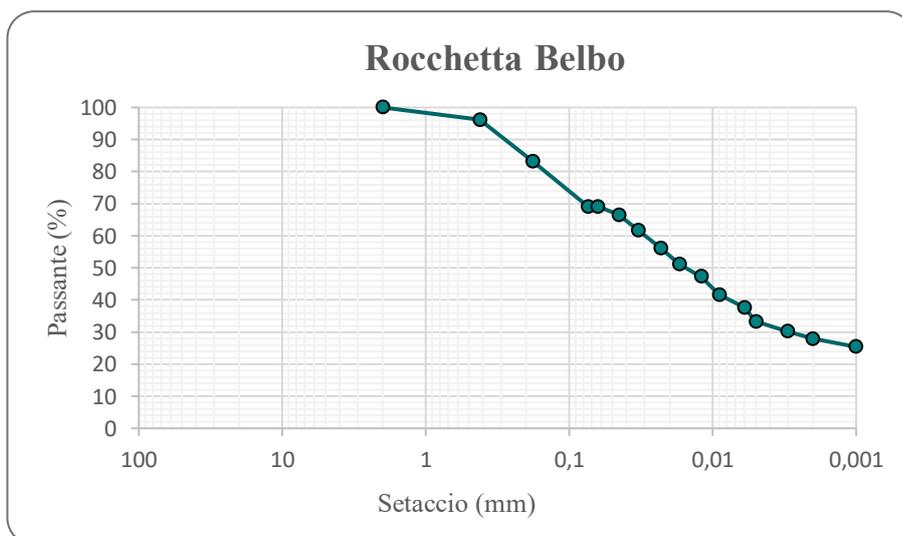


Figura 3.18: Curva granulometrica Rocchetta Belbo, località Pia

3.3.1 DATI PLUVIOMETRICI

Dopo aver individuato i distacchi oggetto di studio, ci si è occupati di determinare i dati pluviometrici di input per la successiva modellazione idrologica.

Si riportano in Figura 3.18 le piogge orarie misurate dalle stazioni pluviometriche di Alba Vaccheria (CN), Rodello (CN), Cuneo, Diano d'Alba (CN), Govone (CN), La Morra Annunziata (CN), Verduno (CN) e Roccagrimalda (AL) in modo da valutarne l'evoluzione temporale durante l'evento.

Si nota come ad eccezione della stazione di Roccagrimalda, appartenente alla provincia di Alessandria (in verde), la distribuzione temporale del raggiungimento del picco è sostanzialmente uniforme; è lecito dunque applicare il metodo delle distanze inverse pesate, secondo cui la stima del dato di pioggia in corrispondenza dei punti di interesse è inversamente proporzionale alla distanza di questi ultimi dai punti di misura attraverso la relazione:

$$d_{1,2} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

Ne deriva che il dato di pioggia nel punto i-esimo è definito come:

$$\hat{p} = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{p_i}{d_i^2}\right)}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{d_i^2}\right)}$$

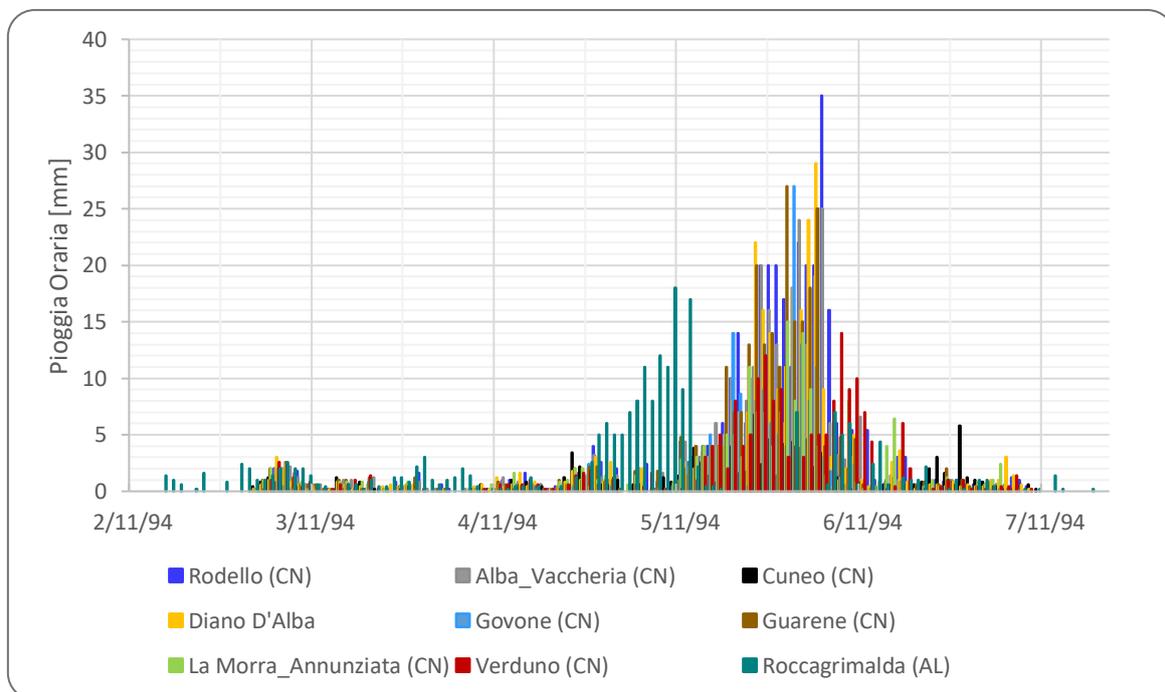


Figura 3.19: Evoluzione temporale delle precipitazioni

Le stazioni geograficamente più vicine ai punti di interesse risultano essere quelle di Alba Vaccheria, Diano d'Alba, Rodello e Verduno.

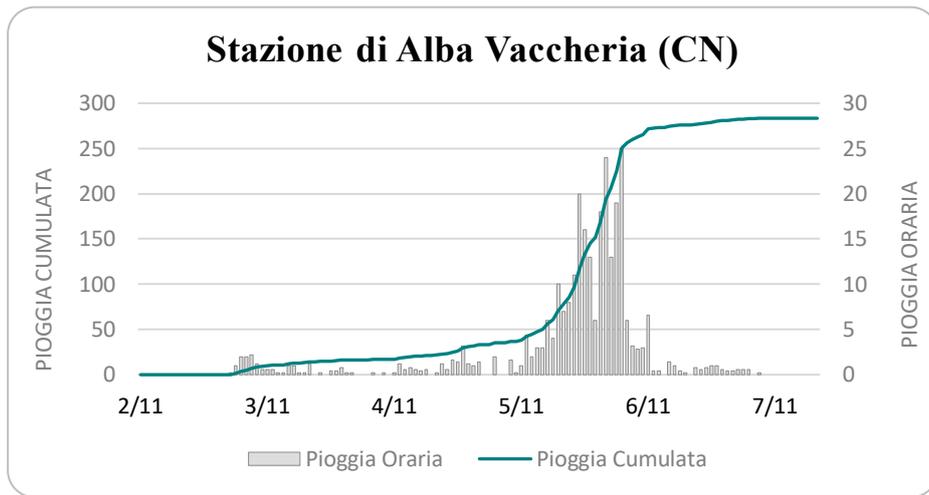


Figura 3.20: Dati di pioggia registrati dalla stazione di Alba Vaccheria (CN)

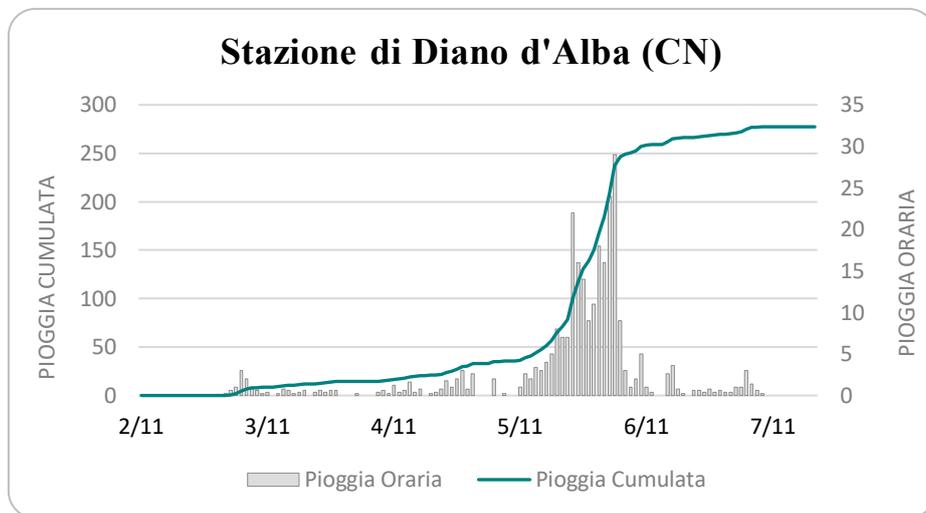


Figura 3.21: Dati di pioggia registrati dalla stazione di Diano d'Alba (CN)

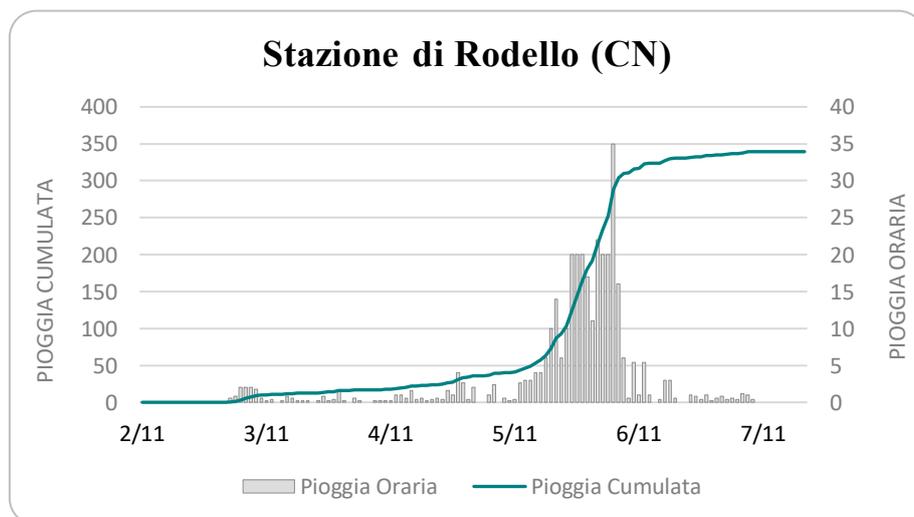


Figura 3.22: Dati di pioggia registrati dalla stazione di Rodello (CN)

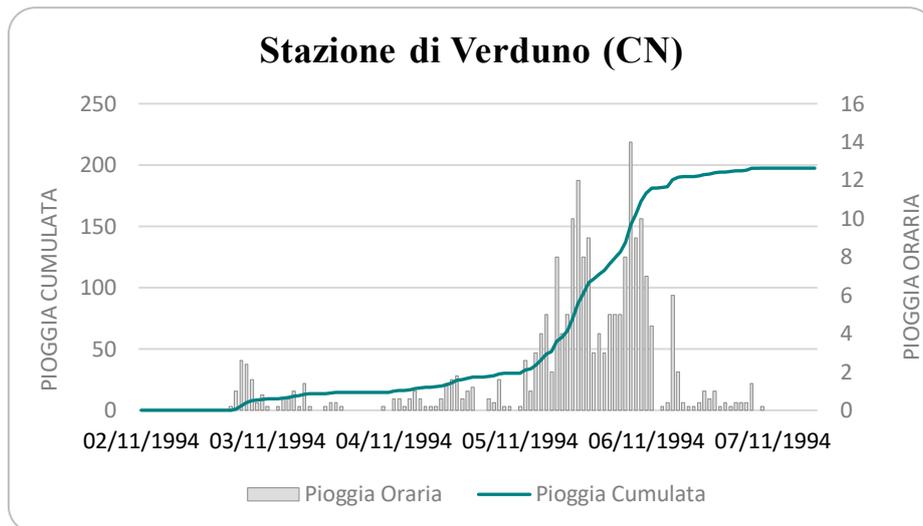


Figura 3.23: Dati di pioggia registrati dalla stazione di Verduno (CN)

3.3.2 DISTACCHI INDIVIDUATI

In Figura 3.23 è evidenziata la distribuzione spaziale dei dissesti individuati, insieme a quella delle stazioni pluviometriche descritte nel paragrafo precedente.

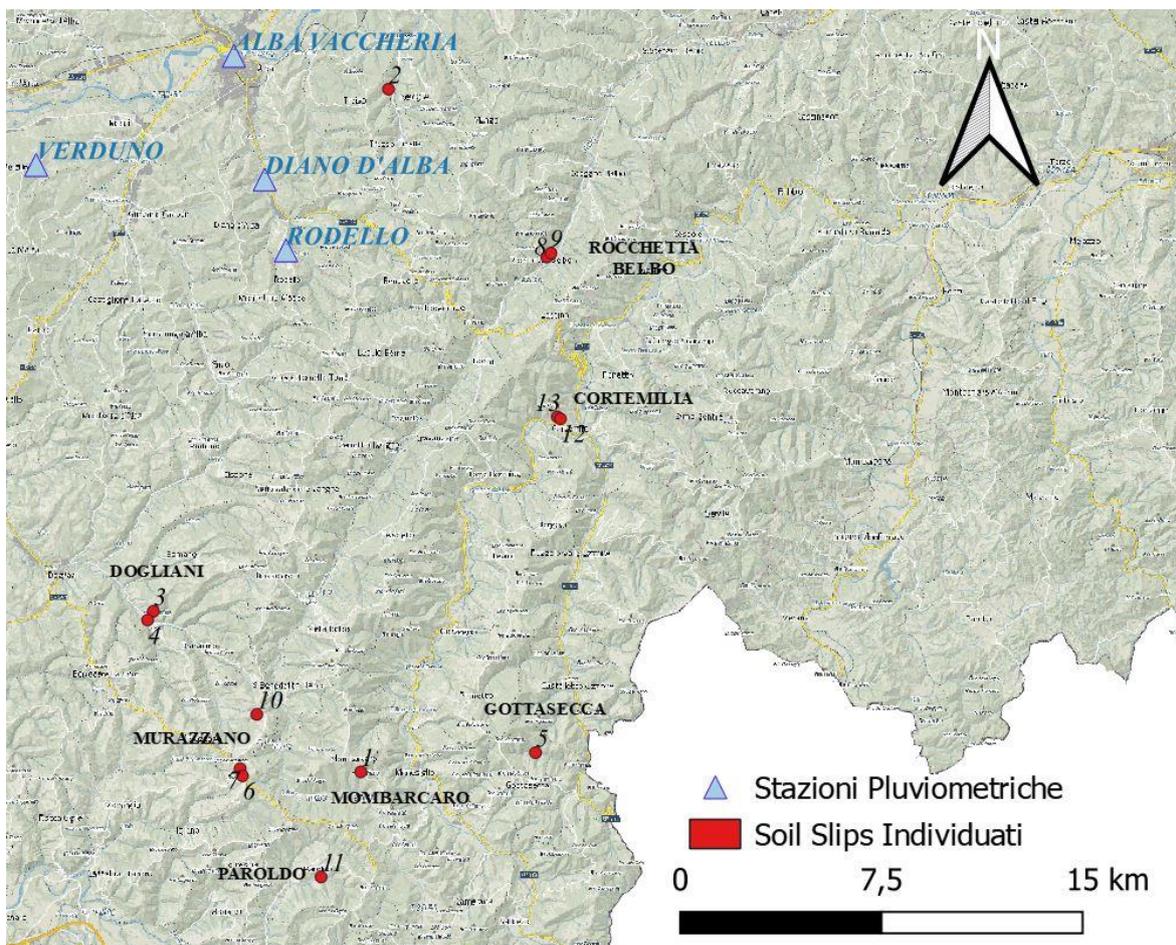


Figura 3.24: Distribuzione spaziale dei distacchi e delle stazioni pluviometriche

4. MODELLAZIONE

4.1 PROPOSTA METODOLOGICA

Alla luce di quanto emerso finora, risulta chiaro di come l'applicazione di schemi risolutivi di tipo concettuale si mostri vantaggiosa ai fini della presente ricerca, permettendo di rimanere orientati verso la comprensione del fenomeno nella propria interezza ma, soprattutto, fornendo uno strumento imprescindibile nel determinare l'entità del fenomeno di distribuzione dei flussi. In altre parole, impiegare un modello idrologico corrisponde in questa sede all'analizzare un versante inserito all'interno del proprio contesto morfologico.

Consapevoli del fatto che trascurare del tutto la durata della precipitazione costituisca una eccessiva approssimazione di quanto accade nella realtà, l'approccio che meglio risponde alle necessità di:

- fornire una rappresentazione del problema parsimoniosa in termini di parametri coinvolti;
- tener conto dei flussi idrologici,

risulta essere quello proposto da Rosso et al. (2002).

Tale scelta è oltretutto giustificata dall'andamento temporale della precipitazione durante l'evento in esame (si rimanda alla Figura 3.18): si nota come questo sia stato caratterizzato da piccoli scrosci che si sono susseguiti nei giorni immediatamente precedenti e in quelli seguenti al raggiungimento del picco, concentrandosi con continuità nei giorni 5-6 novembre. È possibile concludere che la durata dell'evento si aggiri intorno alle 23 ore.

È lecito dunque assumere che i processi idrologici indagati nel Capitolo 2 siano avvenuti in regime stazionario.

Si chiarisce inoltre che, per le motivazioni sopra citate, nelle seguenti elaborazioni saranno trascurati i contributi della porzione di terreno non saturo e della vegetazione, al fine di non introdurre incertezze legate ad ulteriori parametri in gioco.

Nell'ambito di tale formulazione del problema, il ruolo della discontinuità topografica legata alla presenza di tagli stradali permette di mettere in comunicazione lo schema idrologico con una modellazione ad elementi finiti in grado di riprodurre il flusso di versante sotto la condizione di rilassare l'ipotesi di pendio indefinito.



Figura 4.1: Schematizzazione della metodologia proposta

L'intento dunque è quello di realizzare in prima battuta una modellazione idrologica dei casi descritti nel capitolo precedente, in entrambe le condizioni di pendio continuo e non, con l'obiettivo di mettere in luce il raggiungimento della condizione critica in tempi minori da parte dei versanti interessati dalla discontinuità.

Successivamente, sulla scia dei lavori di Mele et al. (2005), si vuole realizzare un'analisi dei flussi mediante il software agli elementi finiti *Slide2D*, con conseguente analisi di stabilità all'equilibrio limite: ci si aspetta un fenomeno di richiamo della falda idrica per l'instaurarsi di una pressione atmosferica in corrispondenza del taglio, con conseguente alterazione della condizione di flusso parallelo al pendio verso una configurazione di falda non piana.

Per completare il quadro relativo al ruolo del taglio come fattore di innesco al franamento superficiale, un approccio alternativo alla modellazione agli elementi finiti è quello derivante dagli studi di Borga et al. (2004), un modello formulato su larga scala in ambiente GIS.

Esso si fonda sull'elaborazione di un algoritmo di intercettazione della falda idrica da parte del taglio, accoppiato al modello SHALSTAB (*Montgomery e Dietrich, 1994*), opportunamente modificato in modo da tener conto dell'incremento di coesione dovuto agli apparati radicali e del sovraccarico attribuito al peso della vegetazione. L'obiettivo principale degli autori è infatti quello di modellare simultaneamente il ruolo del taglio con l'effetto di pratiche di gestione forestali.

Il parametro che consente di quantificare la suscettibilità a franare è costituito da un *indice di impatto*, definito come:

$$RI = 1 - \frac{R_r}{R_h}$$

essendo R_r e R_h i valori di pioggia critica, rispettivamente, in presenza o in assenza della discontinuità.

L'aliquota di flusso sub-superficiale intercettato dal piano stradale è una funzione lineare dell'altezza di falda h_w , determinata come $h_i = h_w - d_{rc}$ (Figura 4.2). Si introduce inoltre la profondità relativa del taglio $r_{rc} = \frac{d_{rc}}{h}$ come quantificazione dell'intercettazione potenziale di ciascun pixel interessato dalla presenza di un percorso stradale.

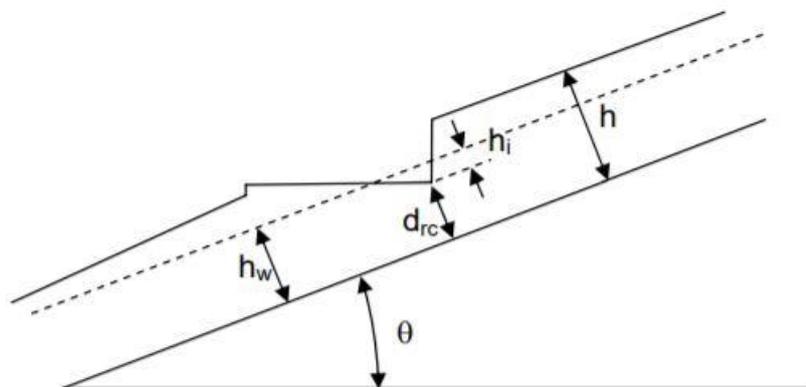


Figura 4.2: Schema di versante adottato nel modello proposto da Borga et al. (2004)

Tale approccio richiede in input un file raster della rete di percorsi stradali, oltre che di un modello digitale del terreno ad elevata risoluzione.

4.2 IL MODELLO DI RISPOSTA IDROLOGICA

4.2.1 ANALISI GEOMORFOLOGICA

Il primo step è consistito nell'analisi di natura geomorfologica e idrologica del DTM, finalizzata nello specifico alla determinazione del gradiente topografico e dell'area contribuyente, ovvero della porzione d'area planimetrica a monte di un elemento topografico discreto che contribuisce alla formazione del deflusso nell'elemento considerato.

Il DTM oggetto di elaborazione prevede una risoluzione della griglia di 5 metri, con una precisione in quota di $\pm 0,3$ m ($\pm 0,6$ m nelle aree boscate o densamente urbanizzate).

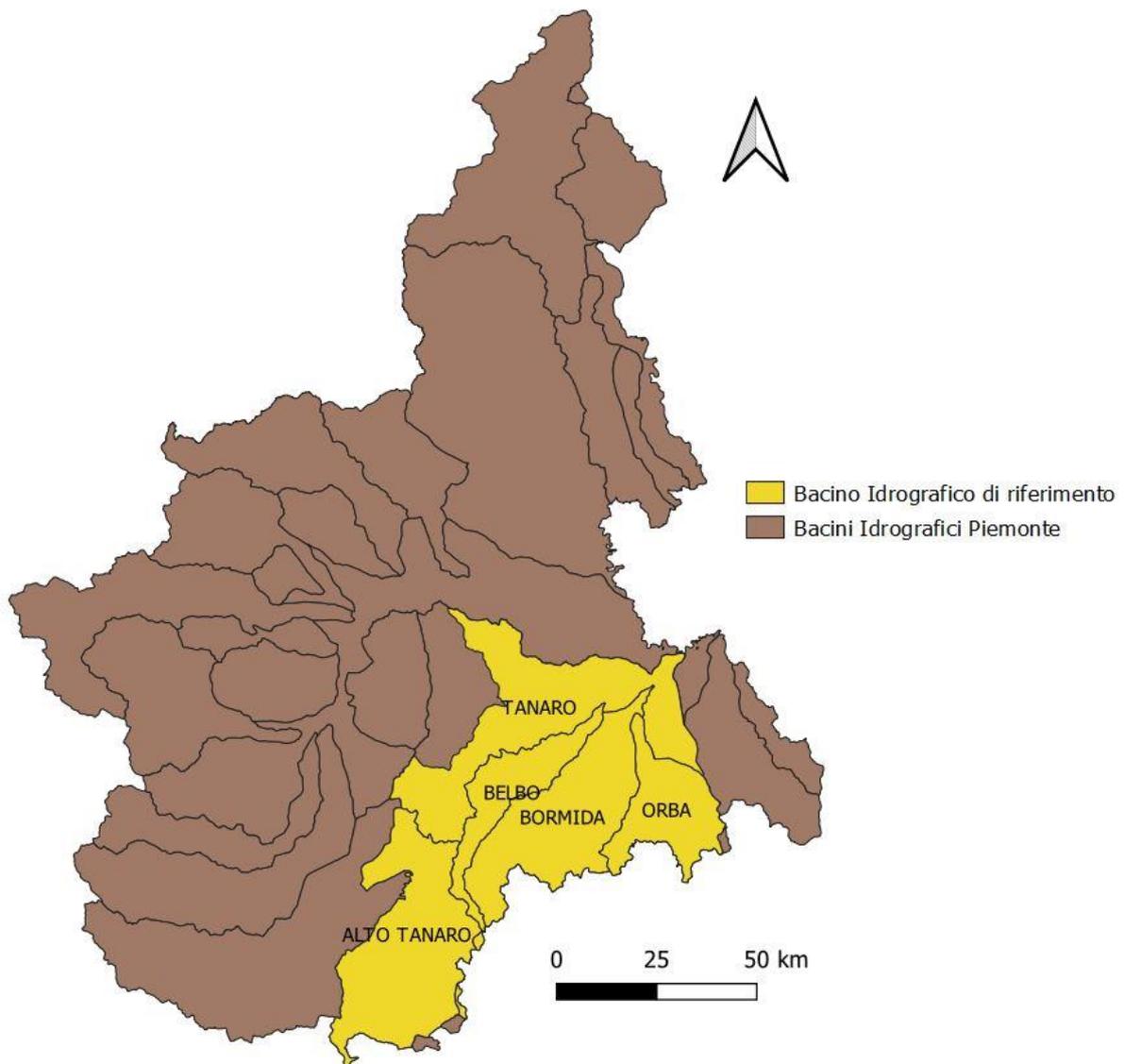


Figura 4.3: Bacino idrografico interessato dall'evento del novembre 1994

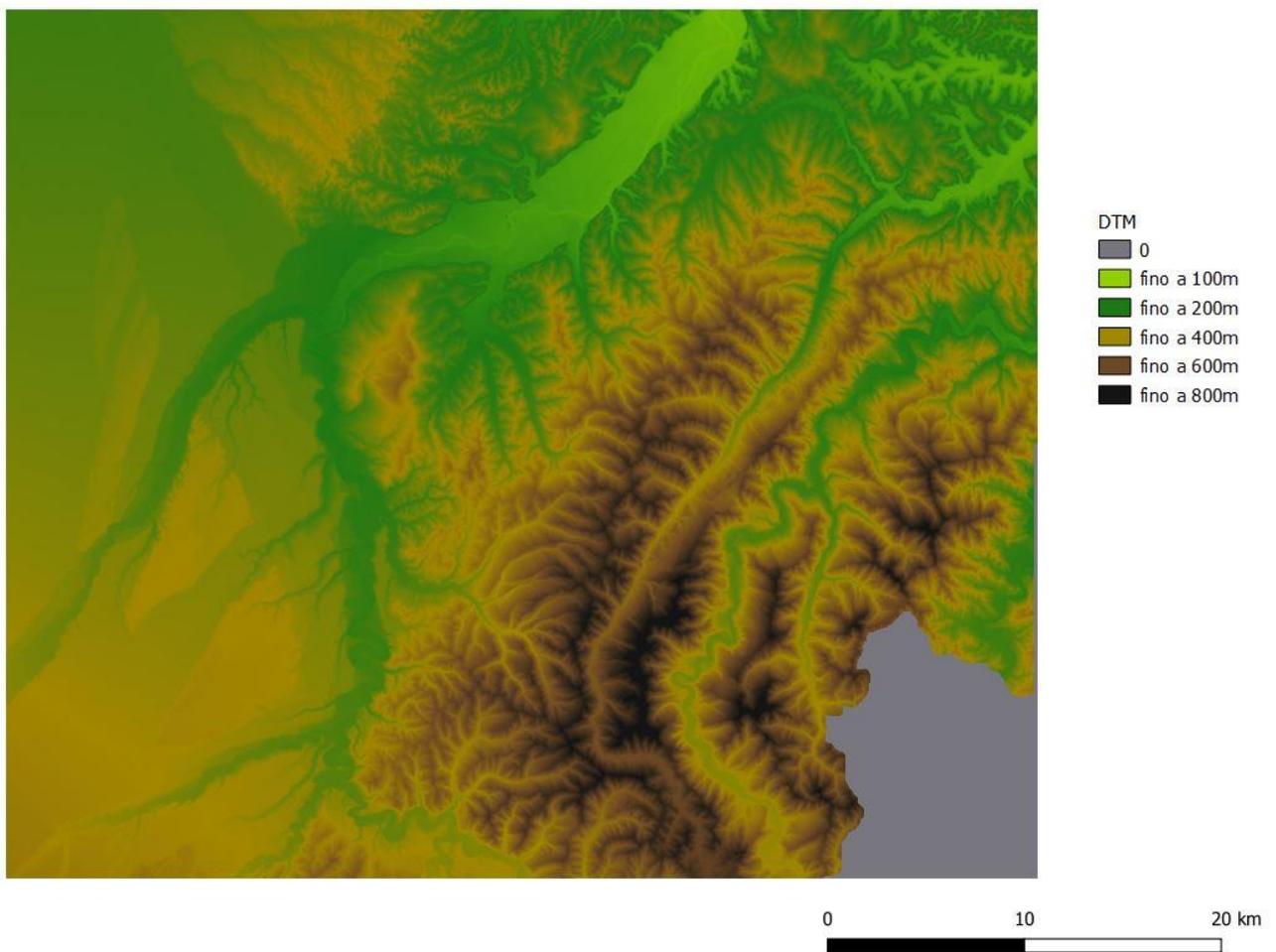
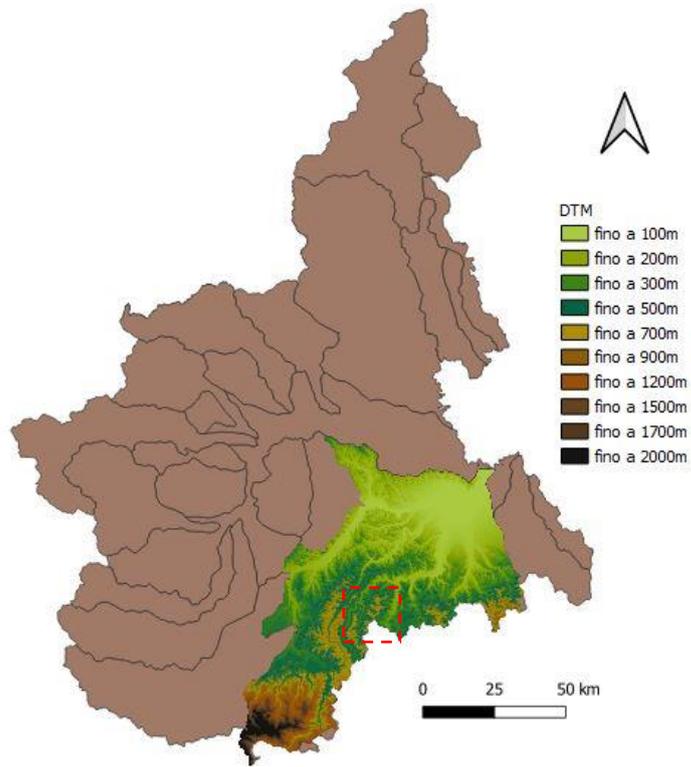


Figura 4.4: DTM dei bacini idrografici interessati dai fenomeni di dissesto (in alto). DTM relativo ai fogli 192, 193, 210, 211 (in basso)

Utilizzando l'apposito plugin implementato in QGIS, si è proceduto con:

- il “riempimento” delle depressioni (assegnando alla relativa cella il valore minimo delle celle circostanti) riscontrate nel DTM (comando *fill sinks*) e generate in fase di creazione dello stesso. Il risultato è un ulteriore DTM in cui non vi siano zone atte all'accumulazione dell'acqua di deflusso superficiale laddove le caratteristiche idrauliche del territorio non lo prevedano;
- la determinazione della mappa delle pendenze, mediante il comando *slope*: esso considera la differenza di quota tra pixel adiacenti e la divide per la dimensione del pixel o della sua diagonale, ottenendo così la pendenza in gradi lungo le direzioni di drenaggio (metodo di Horn, 1981);

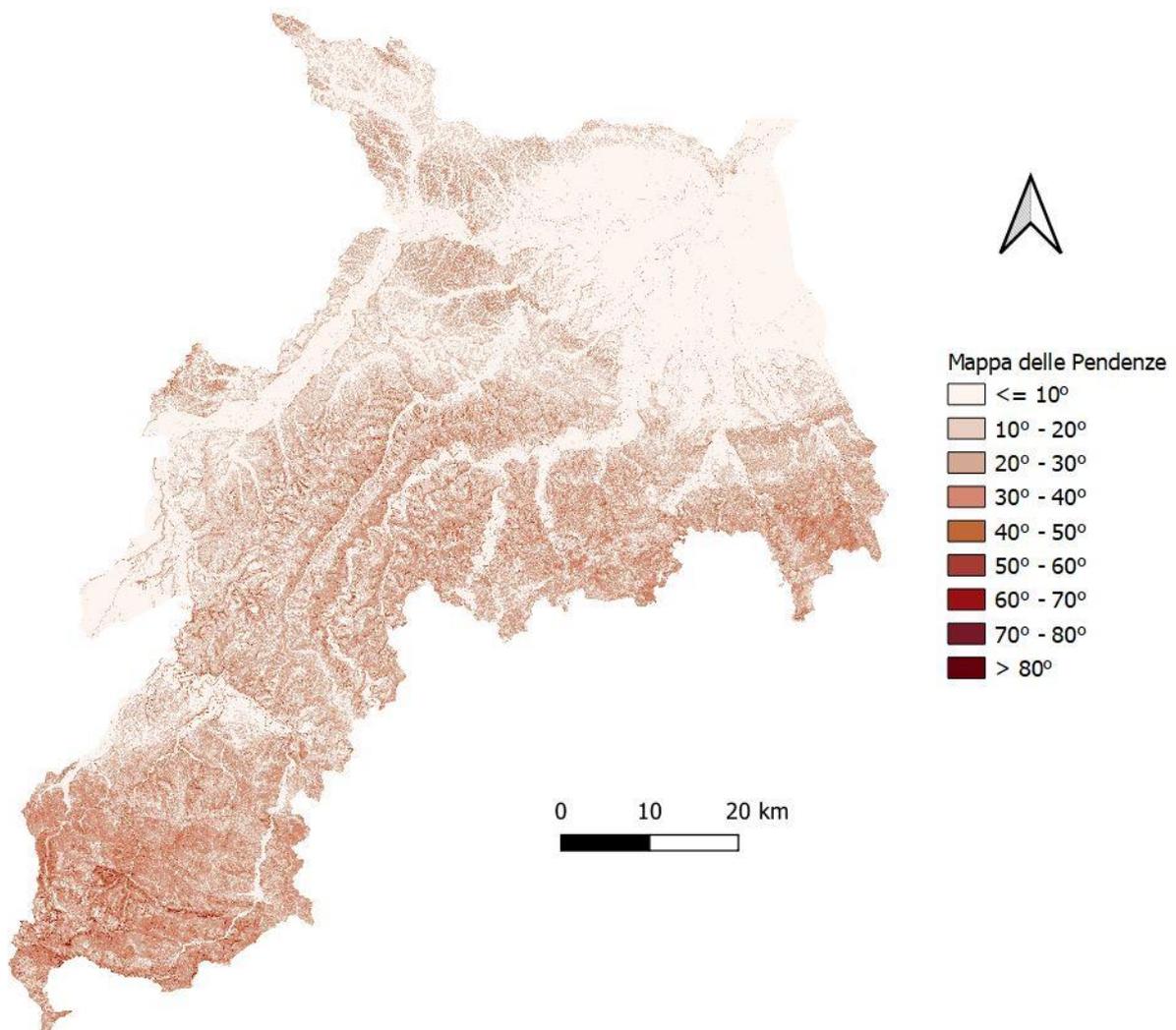


Figura 4.5: Mappa delle pendenze ottenuta mediante il comando *Slope*

- l'estrazione delle direzioni di drenaggio;
- la determinazione delle aree contribuenti totali, il cui calcolo non è univoco, ma funzione dell'algoritmo adottato per l'identificazione delle direzioni di flusso:
 - a) Algoritmo D8 (O'Callaghan e Mark, 1984)

Si ipotizza che il deflusso attraverso una generica cella del DTM si muova interamente lungo la direzione che esprime il massimo gradiente topografico tra la cella in esame e quelle adiacenti. Le possibili direzioni esplorate dall'algoritmo sono otto ovvero quelle degli assi di simmetria che si irradiano dal centro della cella.

b) Algoritmo D_{∞} (Tarboton, 1997)

Il deflusso che attraversa una certa cella si muove verso valle lungo una sola direzione, ma a differenza di quanto accade per il D8, tale direzione non deve necessariamente coincidere con uno degli otto assi principali di simmetria. La superficie di ciascuna cella viene suddivisa in otto porzioni triangolari con vertice condiviso al centro della cella, a ciascuna delle quali viene assegnata una pendenza in funzione della quota dei baricentri delle celle confinanti.

c) Algoritmo Multiple Flow (Quinn et al., 1991)

Nell'algoritmo Multiple Flow infine non viene effettuata la "scelta" di una direzione, ma s'ipotizza che il deflusso si ripartisca tra tutte le celle sottostanti in misura proporzionale a: i) pendenza tra cella ricevente e cella contribuente, ii) lunghezza del tratto di isoipsa che il deflusso attraversa ortogonalmente per raggiungere la cella ricevente. Come per il D8, le possibili direzioni di deflusso sono rappresentate dagli assi principali di simmetria della cella: il deflusso può essere ripartito al massimo in otto parti, se la cella risulta essere la più alta tra tutte le circostanti. Le pendenze tra la cella considerata e le adiacenti a quota inferiore fungono da pesi per determinare la porzione di deflusso in ciascuna delle direzioni.

Nella presente elaborazione è stato adottato l'algoritmo D8.

- l'estrazione delle curve di livello;
- la determinazione delle aree contribuenti specifiche, definite cioè per unità di larghezza dell'isoipsa. Nuovamente è stato implementato l'algoritmo D8.

Si nota tuttavia come la mappa raster ottenuta in output non risulti granché informativa (Figura 4.6); se ne calcola dunque il logaritmo in modo da visualizzare in maniera più chiara la rete idrografica.

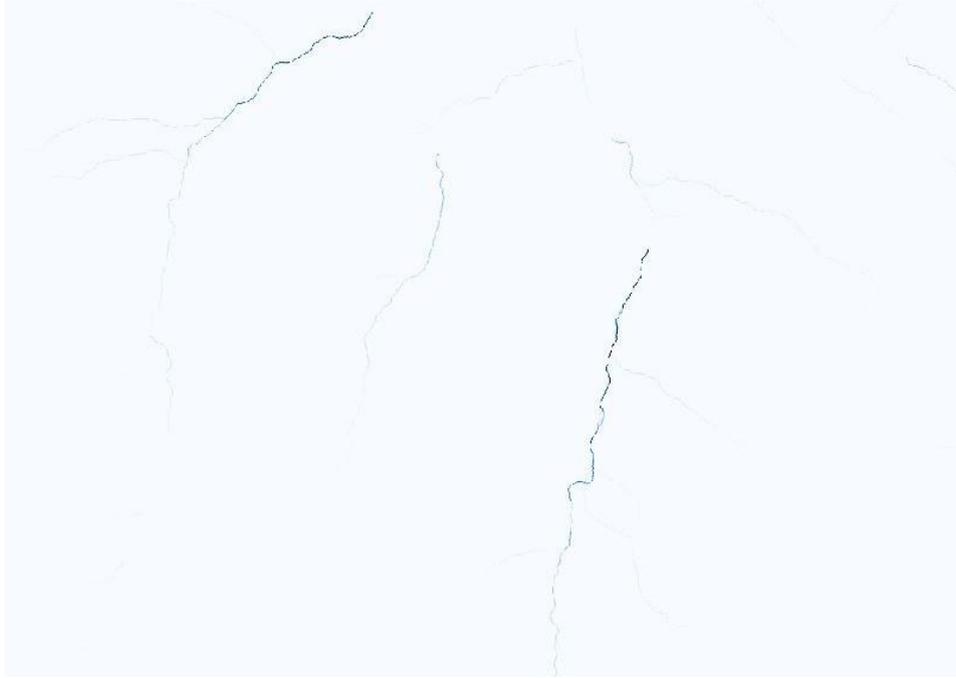


Figura 4.6: Dettaglio della mappa delle Aree contribuenti specifiche. Si nota come tale layer risulti poco informativo

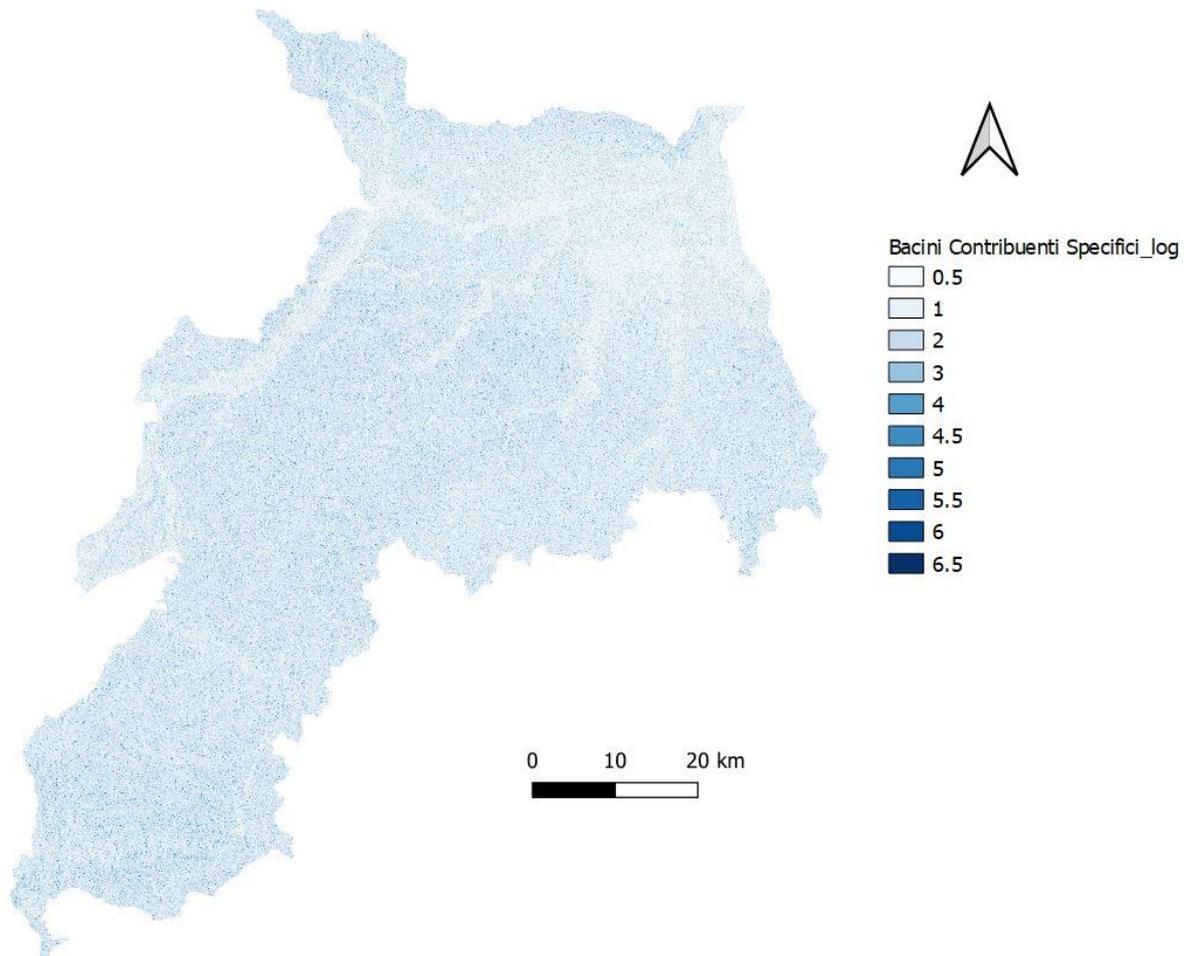


Figura 4.7: Mappa del logaritmo delle Aree Contribuenti specifiche

Si nota come pixel più scuri, aventi quindi un bacino drenaggio maggiore, si posizionano effettivamente all'interno di coni d'impluvio, mentre i punti di vetta coincidono sostanzialmente con tratti ad aree contribuenti nulla.

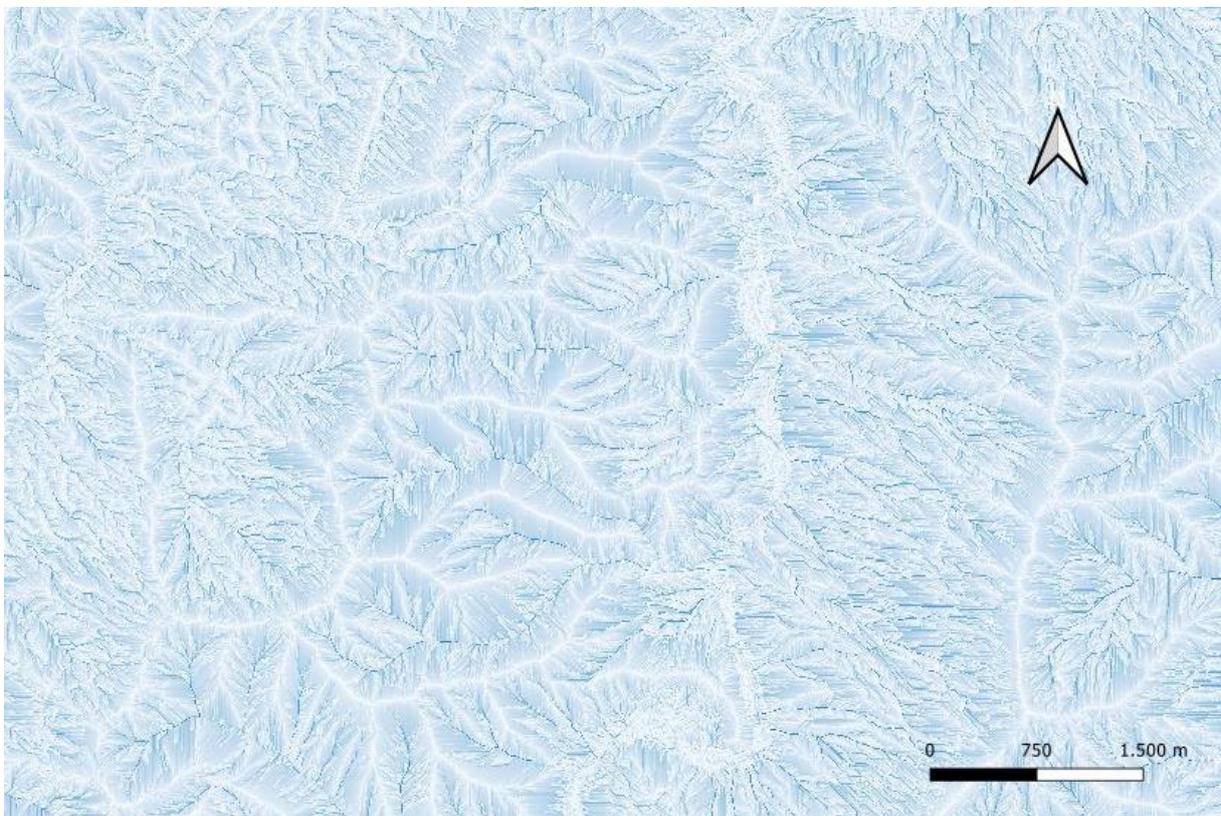
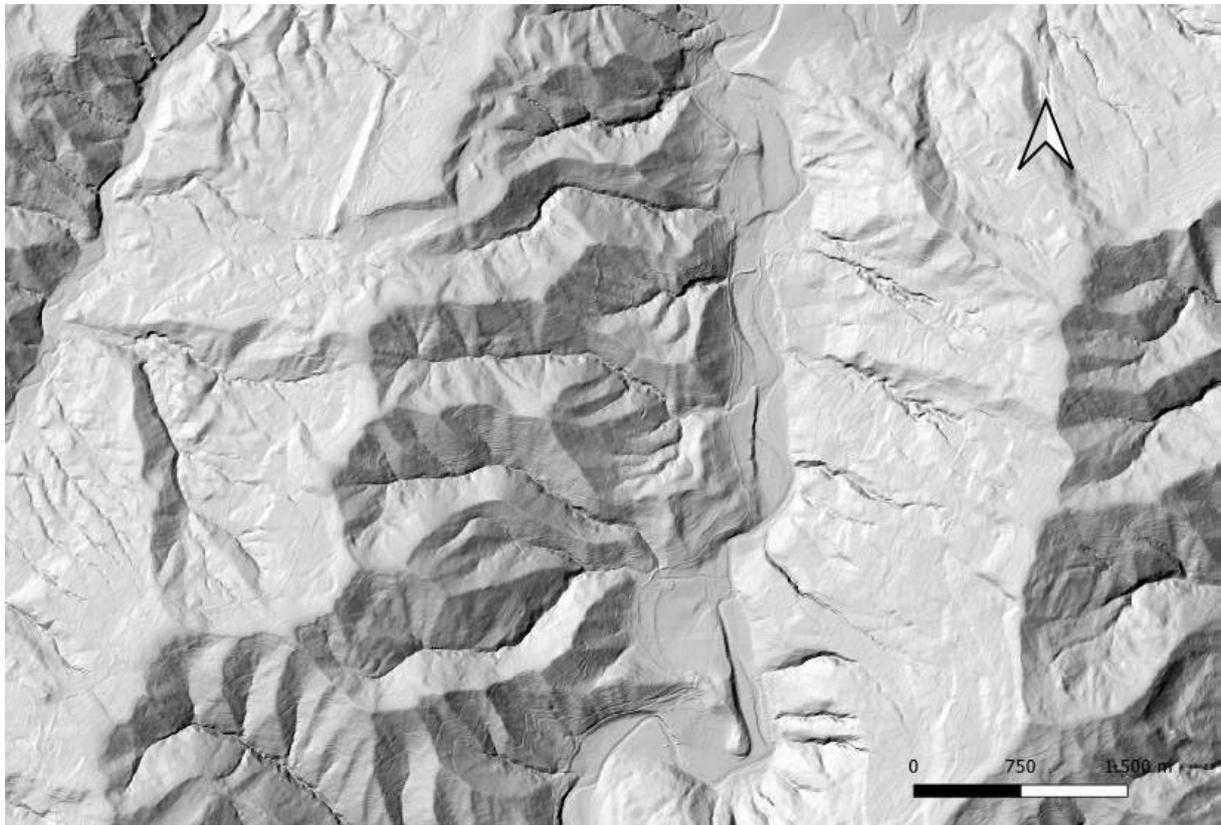


Figura 4.8: Visualizzazione dei coni di impluvio

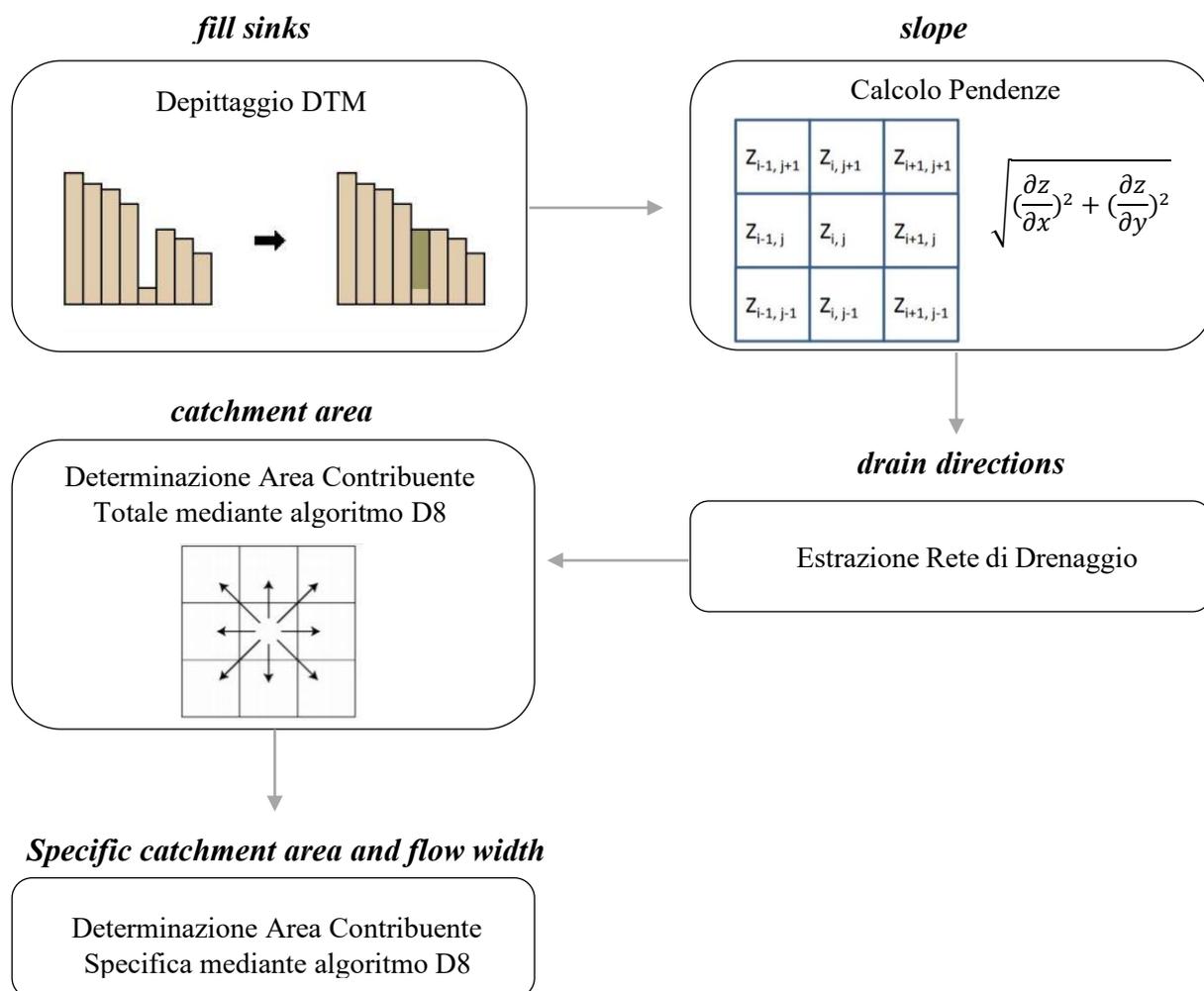


Figura 4.9: Schema di flusso esplicativo dell'analisi geomorfologica del DTM

Si riportano le dimensioni delle aree contribuenti a monte di ciascuno dei distacchi analizzati, ricavate sulla base dei pixel intersecanti il punto di innesco del fenomeno:

n° distacco	A [m ²]	A/b = a [m ² /m]
1	1475	208,6
2	650	130
3	1725	244
4	275	55
5	1075	215
6	2500	500
7	250	35,4
8	325	45,96
9	200	28,28
10	400	80
11	300	42,42
12	225	45
13	575	81,32

Tabella 4.1: Aree Contribuenti Totali (A) e Specifiche (a)

4.2.2 TARATURA DEL MODELLO

L'elevata numerosità del campione di dissesti disponibile il quale, per la maggior parte dei casi studio, fornisce anche informazioni riguardanti l'ora di innesco del distacco, ha consentito di calibrare i parametri di input del modello idrologico: assunta la validità delle geometrie di frana provenienti dal database SIFRAP, così come della caratterizzazione geomorfologica del bacino in esame e dei dati pluviometrici e supponendo dunque che la fonte principale di incertezza provenga dai parametri di suolo, si è scelto di procedere alla taratura del valore di permeabilità satura e del parametro geotecnico di coesione.

Questo perché nonostante siano noti i risultati delle operazioni di campionamento descritti nel precedente capitolo, essi fanno riferimento a campioni di terreno prelevati a profondità superiori ai 2m; al contrario, i fenomeni indagati nella presente ricerca coinvolgono per lo più la coltre superficiale di terreno, per uno spessore che va dai 50cm fino ad un massimo di 1,5 metri. Si ha quindi a che fare con un terreno vegetato, caratterizzato da una circolazione idrica sicuramente differente rispetto agli strati sottostanti.

Il vantaggio di tale metodologia sta nel fatto che le due procedure di calibrazione sono del tutto disgiunte: il valore di K_{sat} regola il deflusso all'interno dello schema di versante adottato, definendo le tempistiche di smaltimento dell'apporto meteorico, mentre il parametro c interviene nell'analisi di stabilità meccanica, ovvero nella determinazione del fattore di sicurezza.

Da notare come tale modalità di procedere sia in qualche modo speculare a quella adottata negli studi di Borga et al. (2002, 2004, 2005) dove, essendo l'area di indagine dell'ordine di decine di km^2 , la taratura avviene sui parametri macroscopici del modello (nello specifico, sull'algoritmo assunto per il calcolo dei bacini contribuenti) fino a che il numero di instabilità previste dal modello non coincidono con quelle effettivamente verificatesi; in questa sede invece si è partiti dalle singole instabilità, dunque la calibrazione riguarda i parametri di suolo.

4.2.2.1 TARATURA DELLA PERMEABILITÀ

La taratura di K_{sat} è avvenuta assumendo un flusso idrico stazionario in equilibrio con l'afflusso medio verificatosi a partire dalle ore 1:00 del giorno 5 novembre fino al momento di avvenimento del distacco e ipotizzando che in quell'istante il terreno fosse completamente saturo. In prima battuta è stata trascurata la precipitazione antecedente al giorno 5, dell'ordine di pochi millimetri.

Due sono le configurazioni adottate:

- a) schema di *bucket model*, simulando cioè la saturazione di un vaso di capacità costante riempito dall'afflusso e svuotato dal deflusso sub-superficiale;
- b) schema di *rifiuto* del terreno, depurando cioè lo ietogramma lordo della quota parte del flusso di ruscellamento superficiale mediante il metodo del deflusso proporzionale ψ .

Mentre lo schema a) fornisce un limite superiore per la permeabilità, dunque di sicuro maggiore di quella reale, dalla configurazione b) deriva un valore inferiore, funzione del coefficiente ψ assunto. Si ha dunque un range di variazione di k il cui limite inferiore viene fissato intorno ad un valore di $1 \cdot 10^{-5}$ m/s, considerate le caratteristiche pedologiche della coltre superficiale.

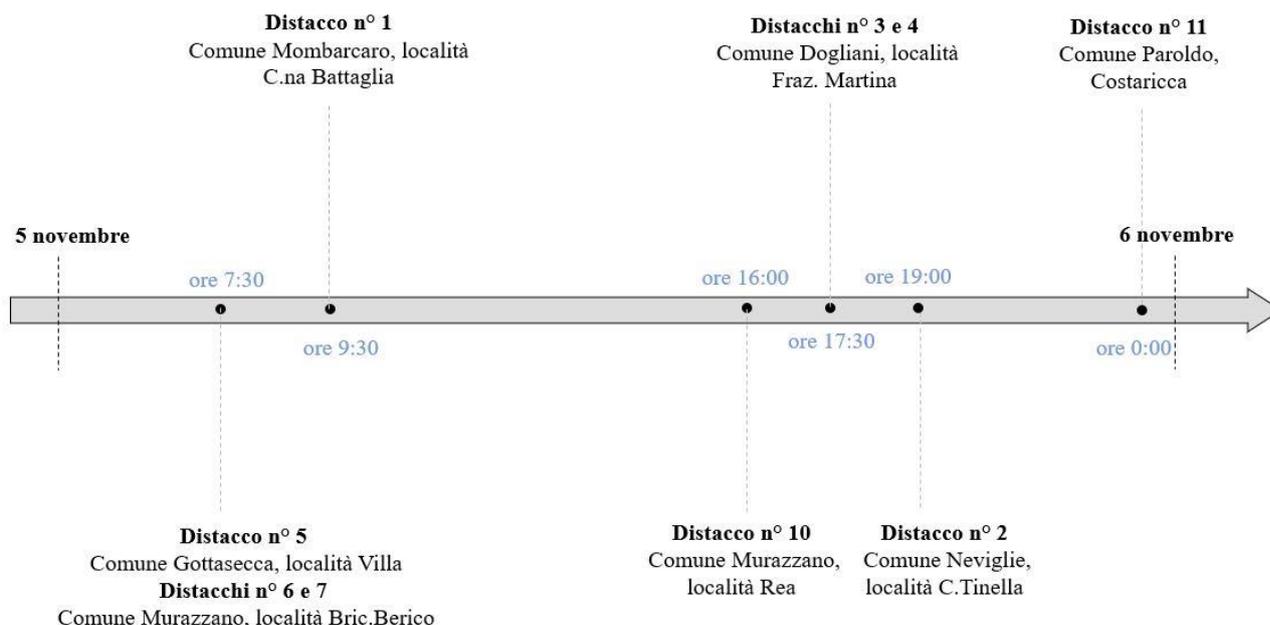


Figura 4.10: Distribuzione temporale dei distacchi. L'ora di innesco non è disponibile per 4 dei 13 casi studio

TARATURA $k_{saturato}$ [m/s]		
n° distacco	BUCKET MODEL	RIFIUTO DEL TERRENO ($\psi=0,7$)
1	6,79E-04	2,04E-04
2	1,76E-03	3,29E-04
3	1,91E-03	5,72E-04
4	2,72E-04	8,17E-05
5	5,75E-04	7,30E-04
6	2,90E-03	8,69E-04
7	2,14E-04	6,43E-05
8	-	-
9	-	-
10	7,35E-04	2,10E-04
11	3,82E-04	1,14E-04
12	-	-
13	-	-

Tabella 4.2: Calibrazione del valore di permeabilità satura

I valori ottenuti sono coerenti con le caratteristiche di un suolo superficiale vegetato.

4.2.2.1 TARATURA DELLA COESIONE

La taratura del parametro di coesione è stata eseguita realizzando la modellazione meccanica dell'istante di instabilizzazione, ovvero ponendo un valore di FS pari a 0,99 e ipotizzando nuovamente lo strato di terreno completamente saturo.

Il valore così ottenuto risulta essere la soglia limite superiore.

TARATURA IN CONDIZIONE DI $h=z$				
n° distacco	c [Kpa]	F _{stabilizzanti} [Kpa]	F _{destabilizzanti} [Kpa]	FS [-]
1	2,84	6,723	6,791	0,99
2	3,11	5,890	5,949	0,99
3	3,25	5,087	5,138	0,99
4	5,37	7,516	7,592	0,99
5	3,82	5,413	5,468	0,99
6	1,39	2,842	2,871	0,99
7	1,28	2,751	2,779	0,99
8	4,16	6,598	6,664	0,99
9	5,53	8,585	8,672	0,99
10	0,00	2,208	4,168	0,53
11	2,93	4,889	4,938	0,99
12	8,34	13,077	14,769	0,89
13	5,33	9,618	9,715	0,99

Tabella 4.3: Calibrazione del valore di coesione

Per il distacco n°10 non è stata eseguita la taratura trattandosi di un terreno privo di coesione.

4.2.3 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO

Come anticipato, è stato implementato il modello idrologico proposto da Rosso et al. (2002), con riferimento allo schema riportato in Figura 4.11.

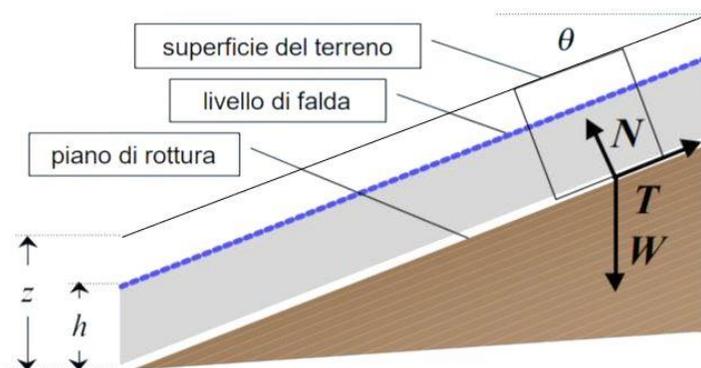


Figura 4.11: Schema di pendio di riferimento

In particolare, l'applicazione è avvenuta su tre livelli a grado crescente di complessità:

- Livello 1: Analisi meccanica di stabilità;
- Livello 2: Analisi dei flussi con intensità di pioggia costante + analisi meccanica di stabilità;

- Livello 3: Analisi dei flussi con intensità di pioggia variabile + analisi meccanica di stabilità.

Questa modalità di indagine consente di stabilire le condizioni per le quali un certo versante sia reso instabile e, di conseguenza, chiarire il ruolo:

- della pendenza del versante (livello 1);
- dell'entità del bacino contribuente (livello 2);
- dell'intensità di pioggia innescante (livello 3).

4.2.3.1 LIVELLO 1

Una prima classificazione dei versanti è di stampo puramente meccanico, stabilendo le condizioni di assoluta stabilità/instabilità o di stabilità/instabilità condizionata.

Tramite considerazioni di equilibrio statico sullo schema di riferimento, è possibile ricavare la condizione di equilibrio limite:

$$w = \frac{h}{z} = 1 - \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} \left[1 - \frac{1}{\tan\varphi} \left(\tan\theta - \frac{c}{\gamma z \cos^2\theta} \right) \right]$$

in cui:

- γ è il peso di volume del terreno;
- γ_{sat} è il peso di volume del terreno saturo;
- γ_w è il peso di volume dell'acqua.

Si parla di:

- assoluta stabilità se il versante risulta stabile anche in condizione di completa saturazione ($w=1$):

$$\tan\theta < \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_{sat}} \right) \tan\varphi$$

- assoluta instabilità se il pendio risulta instabile anche in assenza di flussi ($w=0$):

$$\tan\theta \geq \frac{c}{\gamma z \cos^2\theta} + \tan\varphi$$

Per valori intermedi della tangente dell'angolo θ la stabilità è funzione del livello di falda.

La determinazione di tali condizioni è avvenuta valutando il peso dei valori di c e φ in input, facendoli variare come segue:

- $c = 0 \div c_{tarato}$;
- $\varphi = \varphi_{residuo} \div \frac{\varphi_{residuo} + \varphi_{picco}}{2}$.

CONDIZIONE DI ASSOLUTA INSTABILITÀ		
/	φ medio	φ residuo
c tarato	0	1
c nullo	8	12

Tabella 4.4: Numero di versanti incondizionatamente instabili al variare dei parametri in input

Si nota come il valore di coesione abbia un peso maggiore sull'esito della simulazione.

Adottando la combinazione corrispondente ad un solo versante valutato incondizionatamente instabile, il risultato delle elaborazioni è riportato in Figura 4.12, dove viene evidenziato il valore di $w_{critico}$ tale per cui, assegnati θ e φ , risulti $FS = 1$.

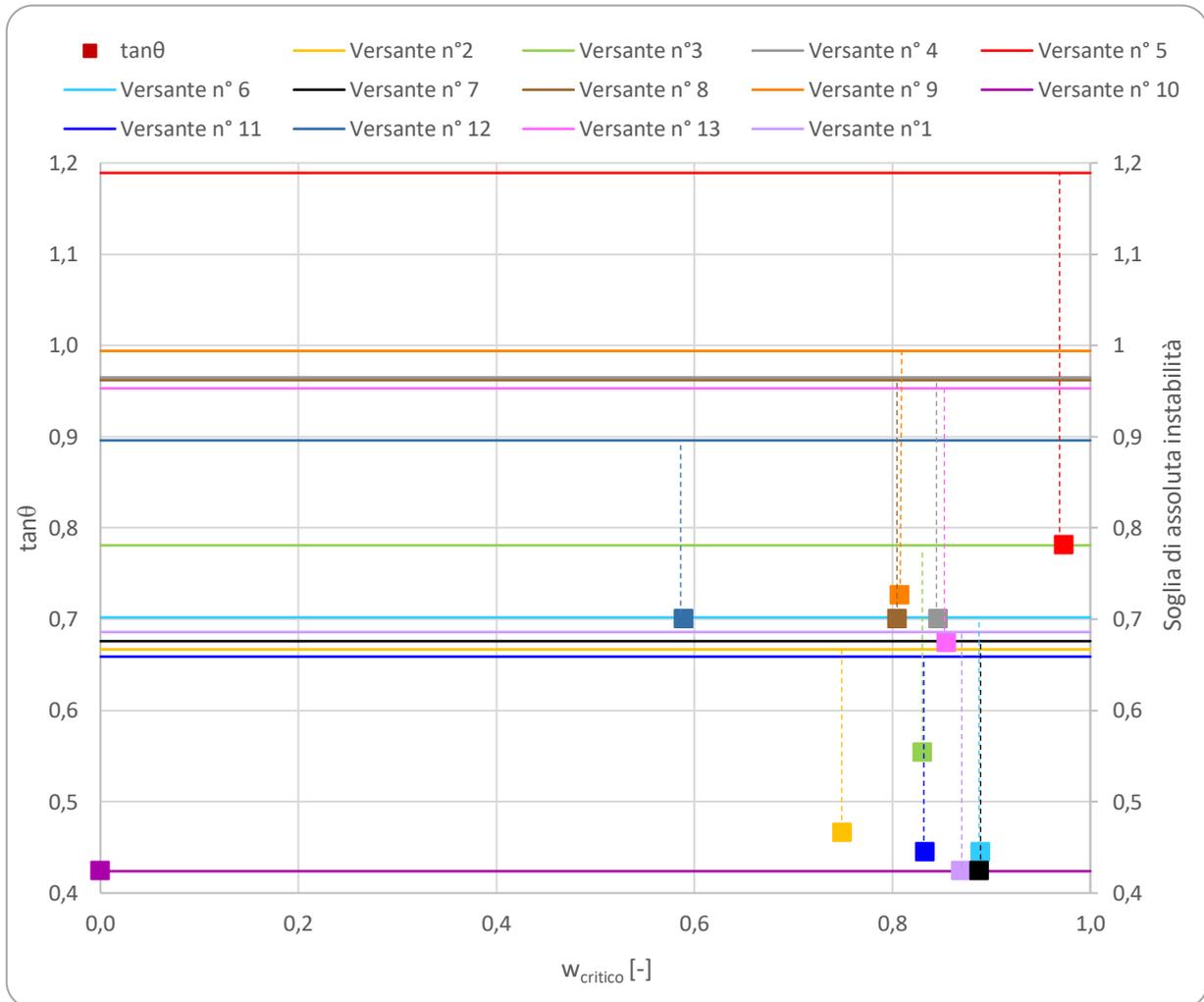


Figura 4.12: Definizione della soglia di $w_{critico}$ per ciascuno dei versanti indagati

n° versante	w_{cr} [-]	$F_{stabilizzanti}$ [Kpa]	$F_{destabilizzanti}$ [Kpa]	FS [-]
1	0,869	6,60	6,60	1,00
2	0,750	5,61	5,61	1,00
3	0,831	4,95	4,95	1,00
4	0,847	7,34	7,34	1,00
5	0,974	5,44	5,44	1,00
6	0,889	2,80	2,80	1,00
7	0,888	2,71	2,71	1,00
8	0,805	6,41	6,41	1,00
9	0,808	8,35	8,35	1,00
10	0,000	3,24	3,24	1,00
11	0,833	4,74	4,74	1,00
12	0,589	13,75	13,74	1,00
13	0,855	9,48	9,48	1,00

Tabella 4.5: Valori di $w_{critico}$ per ciascuno per versanti indagati

Il tempo necessario al raggiungimento di tale valore critico è determinato dalle condizioni di

flusso, indagate nei successivi paragrafi.

4.2.3.2 LIVELLO 2

La seconda classificazione prevede l'applicazione di una sollecitazione meteorica standard, di intensità costante pari a 10 mm/h, coerente con le condizioni pluviometriche reali. L'intento è quello di determinare, a parità di intensità di pioggia e tenendo conto delle caratteristiche fisiche effettive di ciascun versante, il tempo necessario affinché il fattore di sicurezza raggiunga il valore limite.

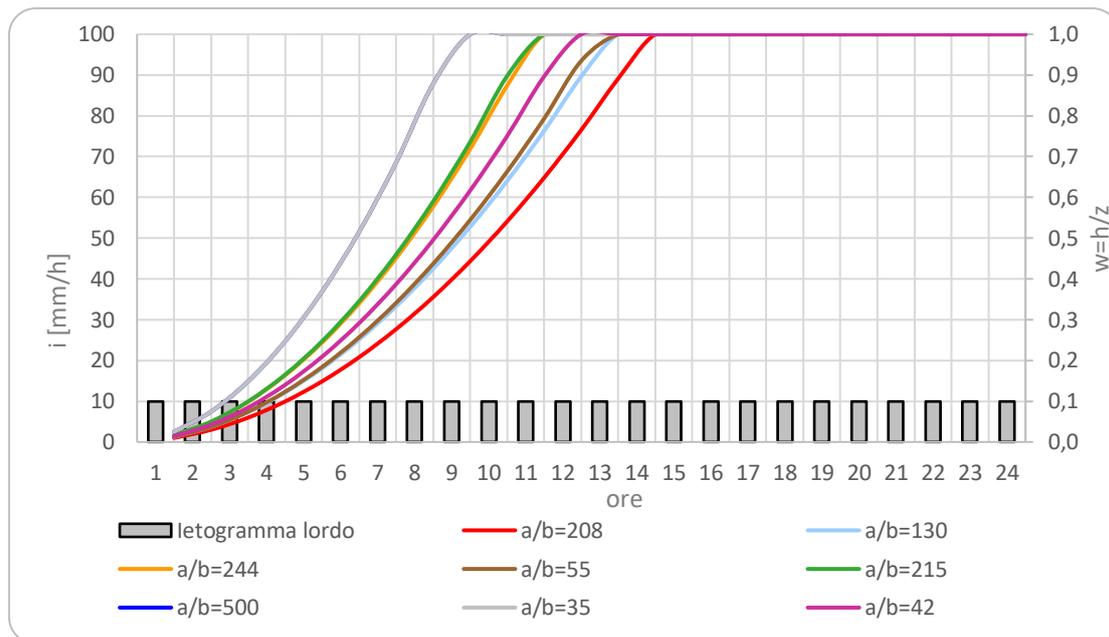


Figura 4.13: Andamento del livello di falda normalizzato rispetto allo spessore di terreno durante le 24 ore, nell'ipotesi che non vi sia deflusso superficiale

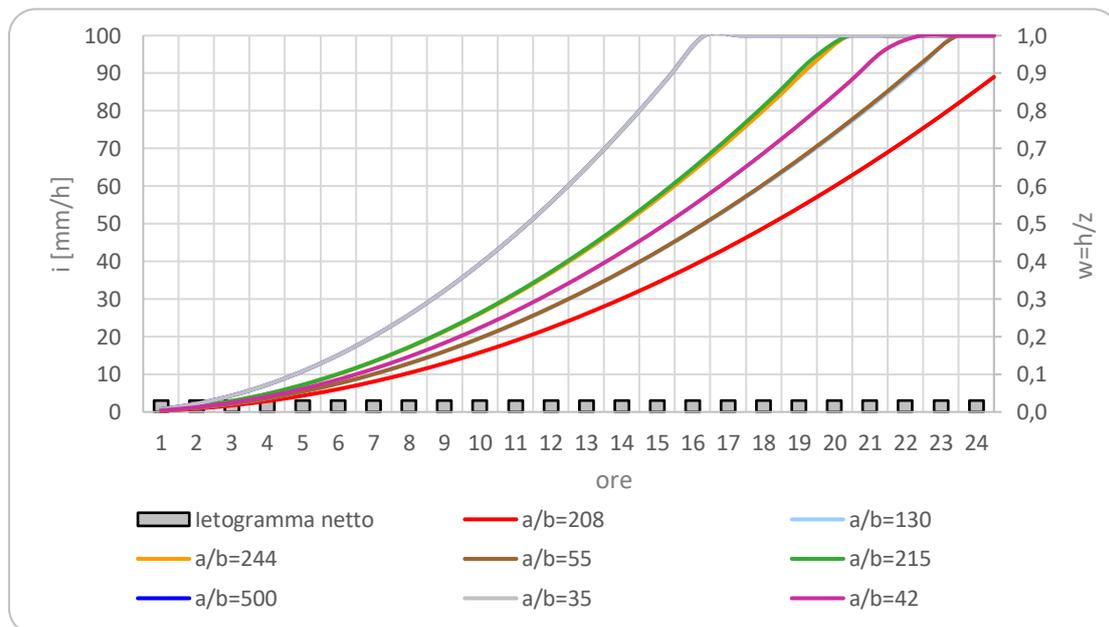


Figura 4.14: Andamento del livello di falda normalizzato rispetto allo spessore di terreno durante le 24 ore, nell'ipotesi che l'infiltrazione riguardi solo un'aliquota della precipitazione

In Tabella 4.7 sono riportati i tempi, espressi in termini di numero di ore, necessari all'instabilizzazione del versante.

n° distacco	k_{max}	k_{Ψ}
1	13	24
2	11	20
3	9,5	18
4	11,5	21,5
5	10,5	19,5
6	8	15
7	8	15
11	10,5	20

Tabella 4.6: Tempi caratteristici dei versanti indagati

Si nota come i versanti n° 6 e 7 presentino una durata caratteristica inferiore rispetto agli altri: la continuità di tali pendii è interrotta dalla presenza di un taglio stradale di dimensione rilevante, trattandosi di una strada provinciale, a differenza del versante n° 11, dove il distacco individuato intercetta un sentiero.

Inoltre, da un punto di vista idrologico il loro comportamento è pressoché analogo nonostante i bacini di drenaggio a monte siano di entità differente; ciò trova spiegazione nella più alta permeabilità del versante n° 6, che favorisce il deflusso bilanciando dunque la maggiore area contribuente.



Figura 4.15: Localizzazione geografica dei versanti n° 6 e 7



Figura 4.16: Localizzazione geografica del versante n° 11

4.2.3.3 LIVELLO 3

Nonostante la modellazione idrologica delle precipitazioni reali porti ad un andamento della falda idrica più complesso, impiegando il valore di permeabilità che tenga conto della parziale infiltrazione, la durata critica si avvicina all'ora effettiva del distacco. Da tener conto che nelle simulazioni eseguite si è trascurata l'aliquota di precipitazione antecedente al giorno 5 novembre.

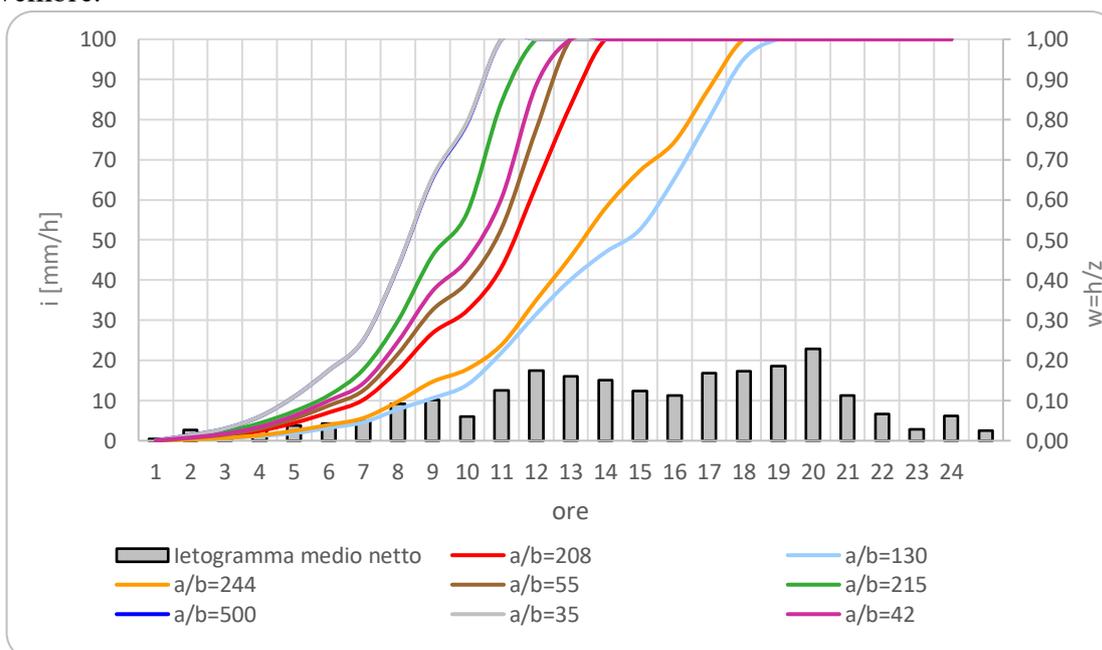


Figura 4.17: Andamento del livello di falda normalizzato rispetto allo spessore di terreno durante le 24 ore, nell'ipotesi che l'infiltrazione riguardi solo un'aliquota della precipitazione

4.3 MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI

All'analisi idrologica, segue una modellazione agli elementi finiti mediante il software bidimensionale *Slide2D* del pacchetto *Rocscience*, il quale permette di realizzare separatamente l'analisi di filtrazione e la successiva analisi di stabilità all'equilibrio limite (LEM) mediante il metodo dei conchi, consentendo di definire un fattore di sicurezza minimo globale.

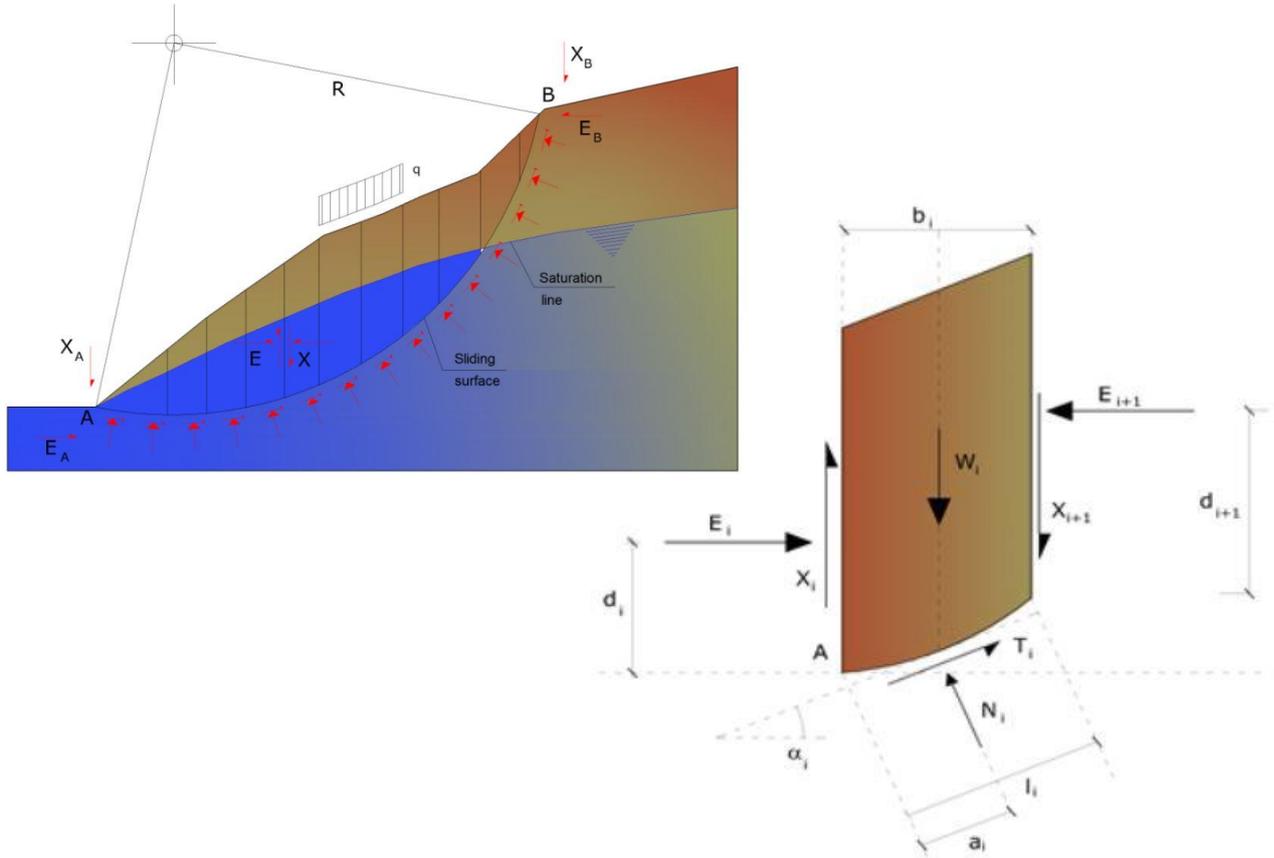


Figura 4.18: Schematizzazione del metodo dei conchi

Il comportamento del terreno è ipotizzato rigido-perfettamente plastico: si immagina cioè che il terreno non si deformi fino al raggiungimento della condizione di rottura e che dunque la resistenza a taglio si mantenga costante.

Oggetto di indagine è il versante n°11 nel comune di Paroldo, in località Costaricca.

n° versante	11
Provincia	CN
Comune	Paroldo
Località	Costaricca
LAT (WGS84, EPSG:4326)	44,430381
LONG (WGS84, EPSG:4326)	8,078254

Tabella 4.7: Localizzazione geografica del versante modellato

Preliminarmente all'implementazione del software, è stata realizzata un'ulteriore operazione di taratura, questa volta incentrata sull'angolo di attrito interno del materiale, assumendo una

coesione nulla e variando il valore di ϕ fino al raggiungimento della condizione limite (FS=0,99) al momento del distacco. Così facendo, sono stati ottenuti valori dell'angolo di attrito interno non coerenti con la natura del terreno in esame, dell'ordine dei 40°; ciò lascia pensare come la natura coesiva della coltre sia non legata ad una reale coesione, ma probabilmente al contributo degli apparati radicali.

Le simulazioni numeriche sono state eseguite assumendo un valore di ϕ pari a 25°.

La modellazione prevede i seguenti step:

- I. Definizione del dominio di indagine, in maniera coerente con il versante reale;
- II. Definizione della mesh e discretizzazione del dominio ai fini dell'analisi di flusso;
- III. Definizione delle proprietà geotecniche e idrauliche dei materiali, secondo i dati noti e/o tarati;
- IV. Definizione delle condizioni al contorno.



Figura 4.19: Schema riassuntivo degli scenari simulati

In merito al punto IV, tre sono le tipologie di condizioni assegnate, in funzione dello scenario simulato:

- *Unknown boundary condition* a valle del modello e sul contorno superiore in assenza di precipitazione in modo tale che, non essendo note le condizioni a priori, il software ricerchi autonomamente la soluzione;
- *Normal infiltration* a monte del versante: la portata specifica proveniente da monte è ottenuta tenendo conto dell'entità del bacino drenante determinato in fase di analisi geomorfologica del DTM e del tempo necessario affinché il flusso percorra l'intero versante, supposto di una lunghezza pari a 100 metri in modo da riprodurre una condizione di pendio indefinito; questa assunzione consente di riprodurre le condizioni di flusso reali.
- *Vertical Infiltration* sul contorno superiore del modello, che vada a simulare un'intensità di precipitazione stazionaria, determinata nuovamente tenendo conto del tempo di percorrenza del versante.

Il contorno inferiore, laddove non è imposta alcuna condizione, viene interpretato come bordo impermeabile, coincidente dunque con l'interfaccia tra lo strato superficiale e il substrato.

La ricerca del fattore di sicurezza critico è stata settata su superfici di scivolamento circolari mediante la modalità *Grid Search* attraverso cui, avendo definito una griglia regolare a passo costante, viene individuato il centro di rotazione di ciascuna delle superfici calcolate. L'ipotesi di superfici circolari, seppur valida a rigore per soli terreni omogenei, rimane applicabile alla semplice stratigrafia modellata.

Gli algoritmi di calcolo implementati sono quelli di Bishop (1955), Janbu (1967), Morgenstern & Price (1965), i quali differenziano per la tipologia e il numero di equazioni risolte per ciascun concio.

4.3.1 PENDIO CONTINUO

La modellazione è avvenuta con l'intento di riprodurre un versante che fosse il più possibile coerente con la configurazione reale: la stratigrafia è costituita da una coltre superficiale di materiale rimaneggiato dello spessore di 70 cm e da uno strato sottostante di natura limoso-argillosa, spesso 4 metri. Il primo è caratterizzato da una permeabilità satura di $1,14 \cdot 10^{-4}$ m/s, dato ottenuto dall'operazione di taratura, il secondo di $6 \cdot 10^{-6}$ m/s.

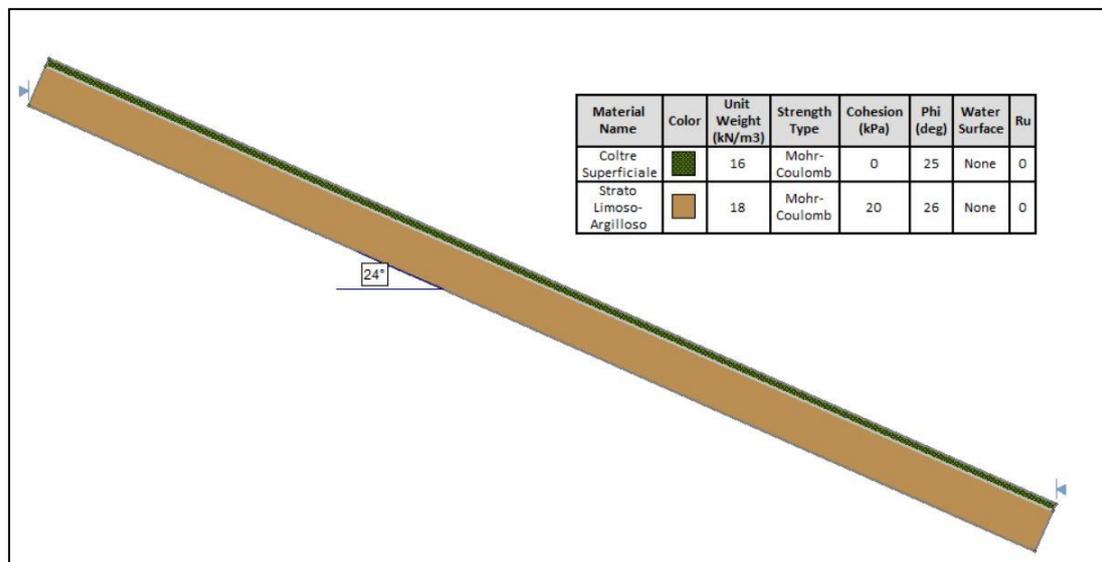


Figura 4.20: Schema di pendio continuo con pendenza e stratigrafia reale

Dopo averne assicurato la stabilità in assenza di flussi, dunque in condizione di terreno completamente asciutto, si è simulata un'infiltrazione normale su tutto lo strato nella sezione di monte, dovuta ad un bacino contribuente specifico di $42,4 \text{ m}^2/\text{m}$.

	k_{sat} [m/s]	q_{monte} [m ³ /h] / [m ²]
Coltre Superficiale	1,14E-04	1,60E-01
Strato Limoso-Argilloso	6,00E-06	8,37E-03

Tabella 4.8: Condizioni al contorno di monte applicate, in funzione della permeabilità dello strato

Si verifica un transitorio spaziale da attribuire alla non omogeneità del terreno indagato: la falda, inizialmente legata alla condizione di flusso nella sezione di monte, raggiunge quasi subito il piano campagna per poi disporsi, più a valle, parallelamente al versante, pur mantenendo una configurazione prossima alla saturazione. È noto dalla letteratura scientifica (Reid, 1997) come variazioni anche modeste in termini di permeabilità (due ordini di grandezza nel caso in esame) possano modificare fortemente il campo delle pressioni interstiziali e, di conseguenza, la suscettibilità a franare.

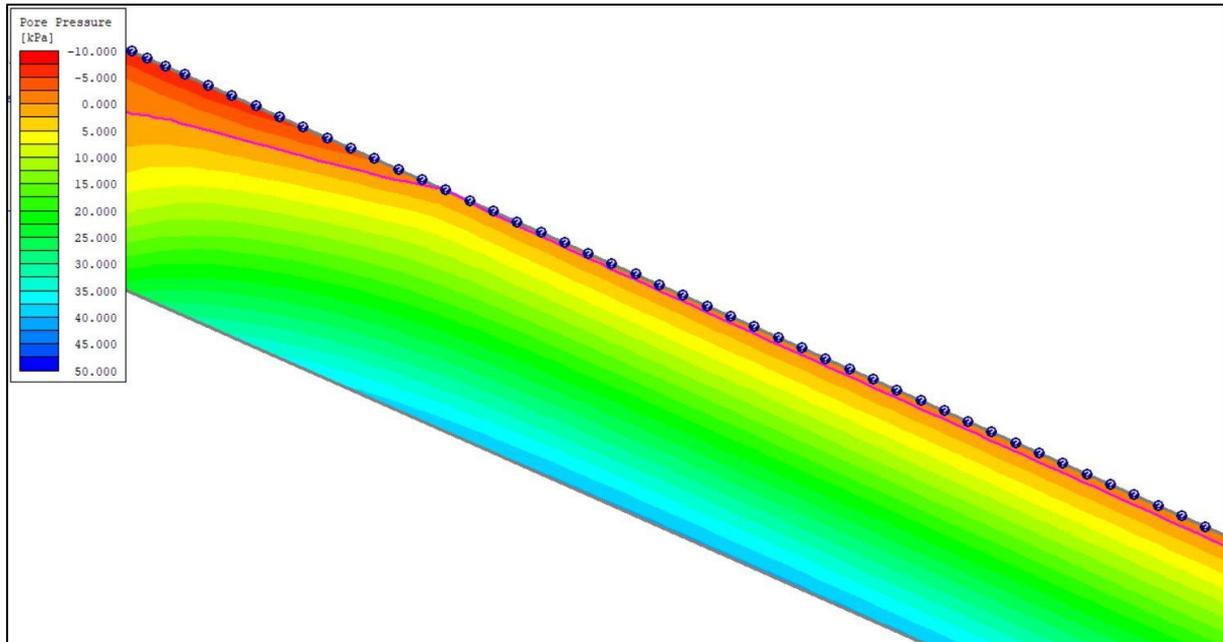


Figura 4.21: Andamento della falda idrica su versante reale continuo nell'ipotesi di sola filtrazione nella sezione di monte, con $A/b=42,4$ m²/m. Particolare del transitorio spaziale di monte

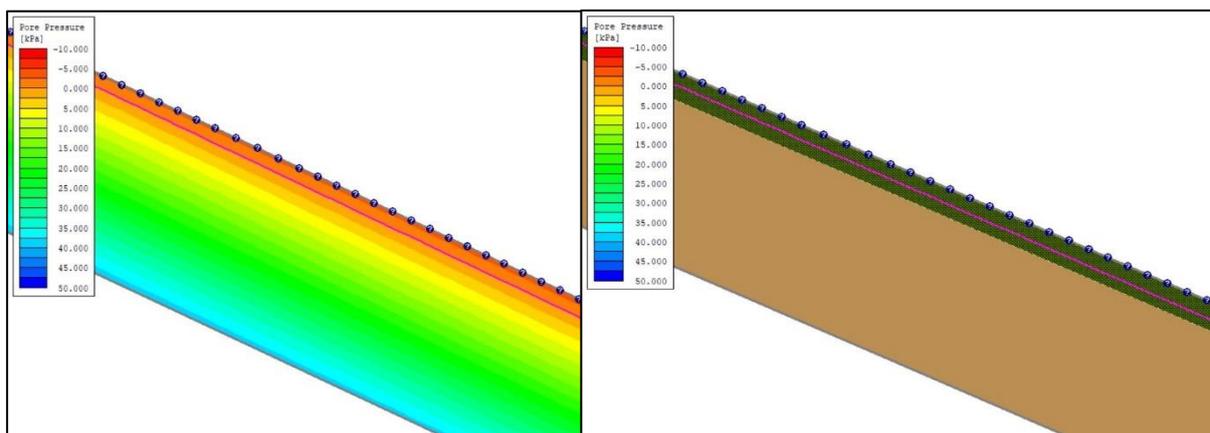


Figura 4.22: Raggiungimento della condizione di flusso parallelo alla stratificazione su versante reale continuo nell'ipotesi di sola filtrazione nella sezione di monte, con $A/b=42,4$ m²/m.

Dall'analisi di stabilità deriva un fattore di sicurezza pari a 0,71; la superficie di scivolamento critica, che si posiziona in una regione di parziale saturazione, all'incirca a metà del versante, presenta un approfondimento massimo di 65 cm circa, interessando effettivamente la coltre superficiale.

Si è inoltre voluta valutare l'influenza nell'analisi di filtrazione dell'estensione del bacino contribuyente a monte: ipotizzando per A/b un valore di 200 m²/m si assiste ad un incremento

generalizzato della pressione interstiziale, con conservazione del transitorio spaziale e spostamento della regione satura più a valle. Stessa collocazione presenta la superficie di scivolamento, con una caduta del coefficiente di sicurezza di circa il 33%.

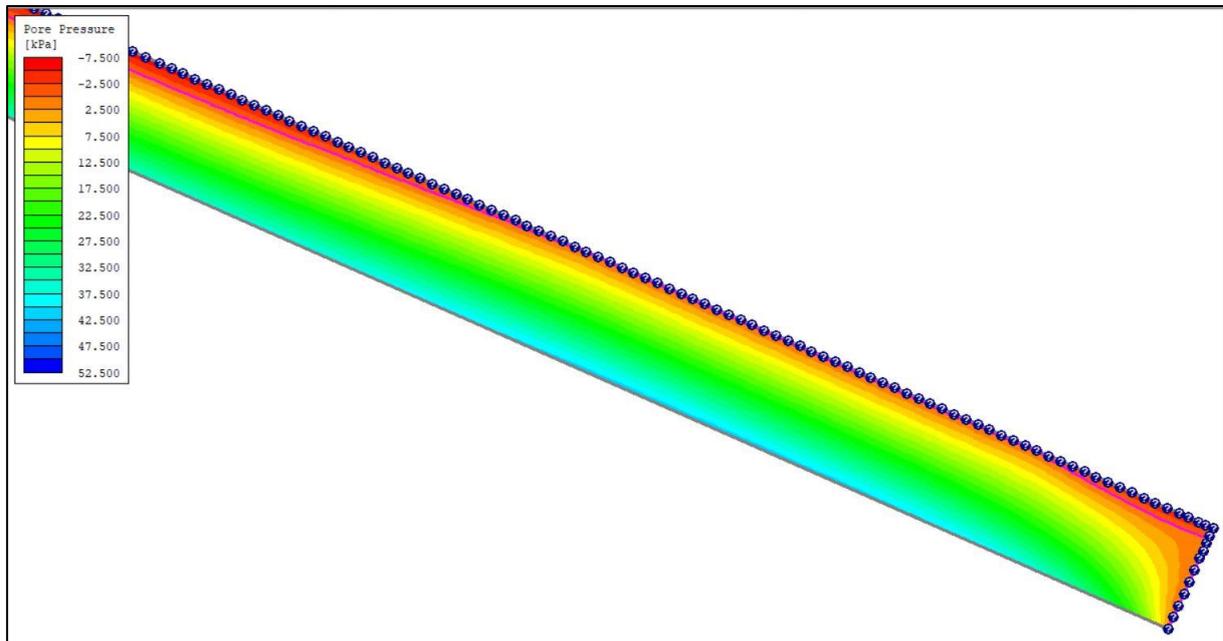


Figura 4.23: Andamento della falda idrica su versante reale continuo nell'ipotesi di sola filtrazione nella sezione di monte, con $A/b=200 \text{ m}^2/\text{m}$. Saturazione del tratto di valle del versante

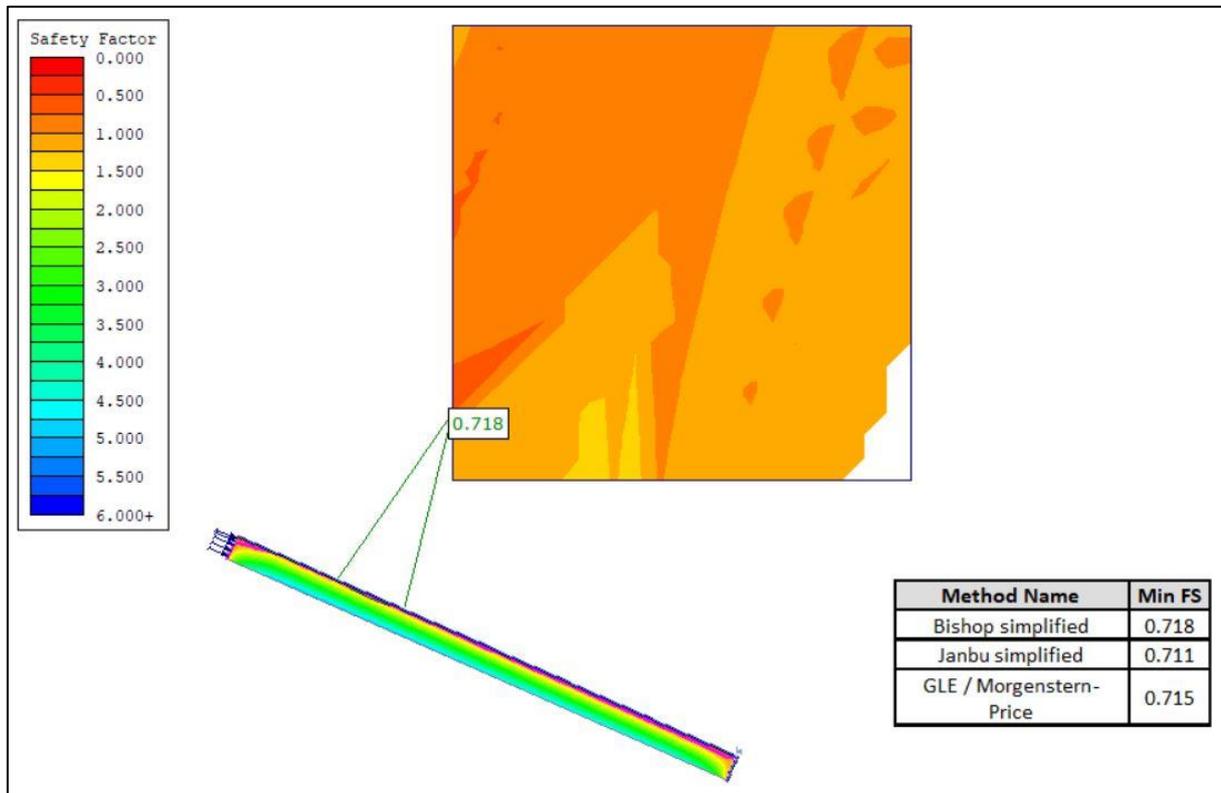


Figura 4.24: Calcolo del Fattore di Sicurezza e della superficie di scorrimento critica, con bacino contribuente a monte $A/b=42,4 \text{ m}^2/\text{m}$

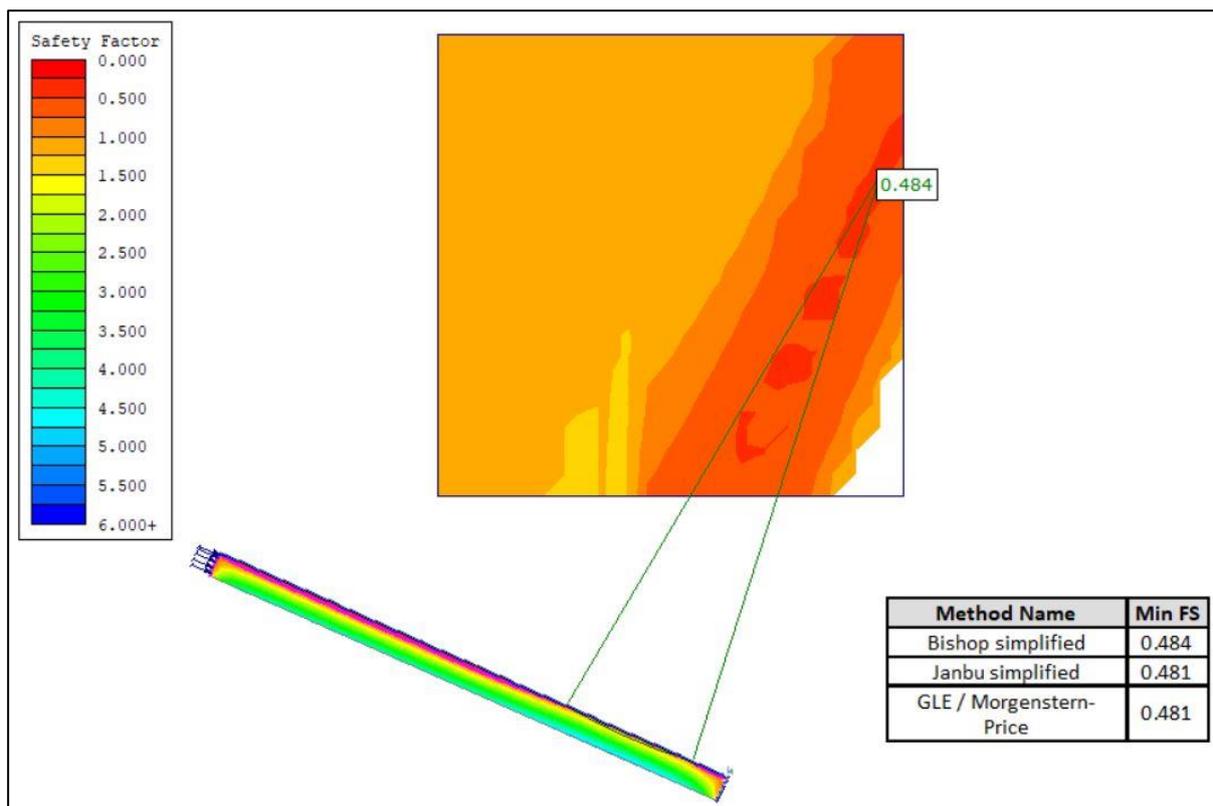


Figura 4.25: Calcolo del Fattore di Sicurezza e della superficie di scorrimento critica, con bacino contribuente a monte $A/b=200$ m^2/m

Al modello è stata poi applicata un'intensità di ricarica verticale a simulare una precipitazione lungo il versante: questa è stata determinata come quel valore che moltiplicato per il tempo di percorrenza del versante in regime stazionario, restituisca un'altezza di precipitazione totale di 240 mm.

Essendo il tempo di percorrenza funzione della permeabilità di ciascuno strato, ci si è posti nella condizione di maggiore criticità, attribuendo un'intensità di ricarica sulla base delle caratteristiche dello strato più superficiale e pari a $9e-4$ m/h.

Si assiste alla riduzione del transitorio spaziale dal momento che la completa saturazione dello strato interessa un tratto più ampio del versante.

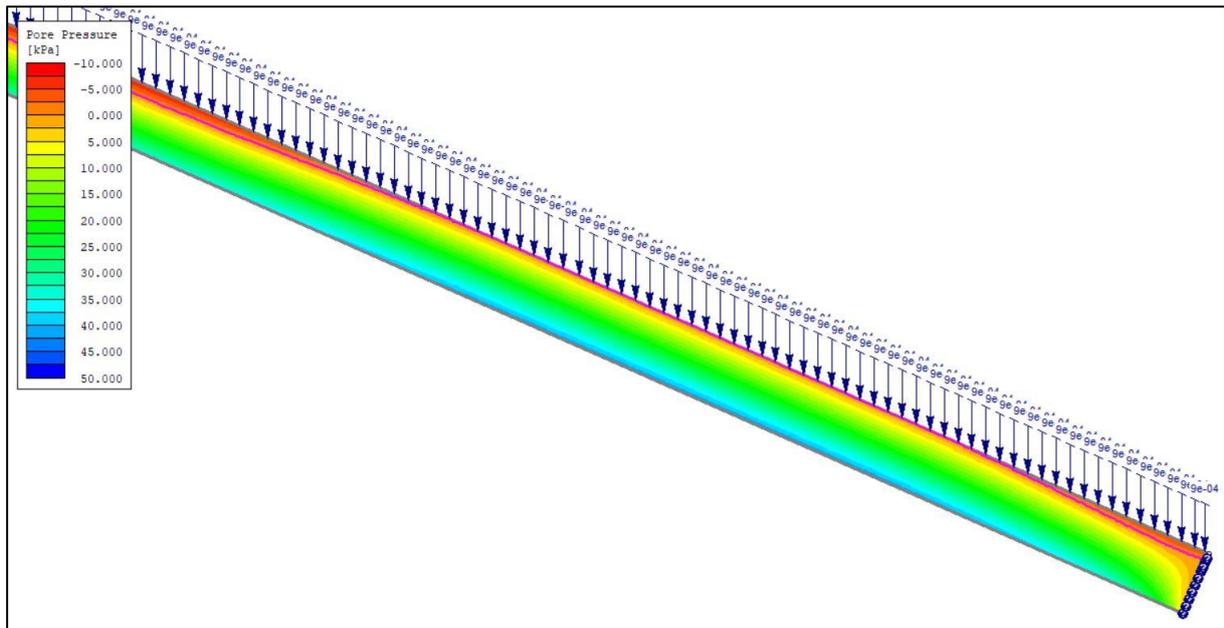


Figura 4.26: Andamento della falda idrica su versante reale continuo nell'ipotesi di filtrazione nella sezione di monte e infiltrazione lungo il pendio di intensità $9e-4$ m/h

LUNGHEZZA DEL TRATTO SATURO [%]		
	ASSENZA DI PIOGGIA	CON PIOGGIA
$A/b = 42,4 \text{ m}^2/\text{m}$ (reale)	5	40
$A/b = 200 \text{ m}^2/\text{m}$	22	63

Tabella 4.9: Percentuale di saturazione del versante al variare delle condizioni al contorno imposte

Contestualmente il fattore di sicurezza si riduce ad un valore pari a 0,51.

A titolo di confronto, in particolare sull'andamento della *water table*, sono state eseguite le medesime simulazioni nel caso di un versante omogeneo, dello spessore di 4 metri, costituito interamente del materiale della coltre superficiale.

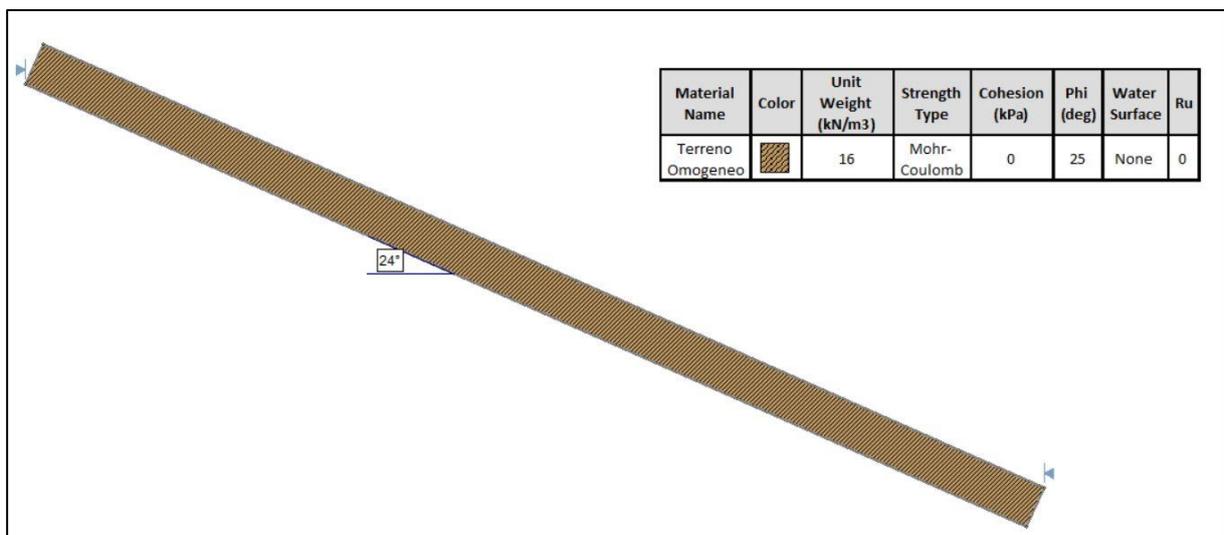


Figura 4.27: Schema di pendio continuo con stratigrafia semplificata

Si nota l'assenza del transitorio spaziale: la falda si dispone fin da subito parallelamente al versante, instaurando una condizione di moto uniforme e mantenendosi lontana dalla configurazione di totale saturazione. A differenza di quanto visto per il versante reale, l'influenza di A/b non si ripercuote sul comportamento globale che rimane il medesimo, ma si traduce in un incremento generalizzato dell'altezza di falda.

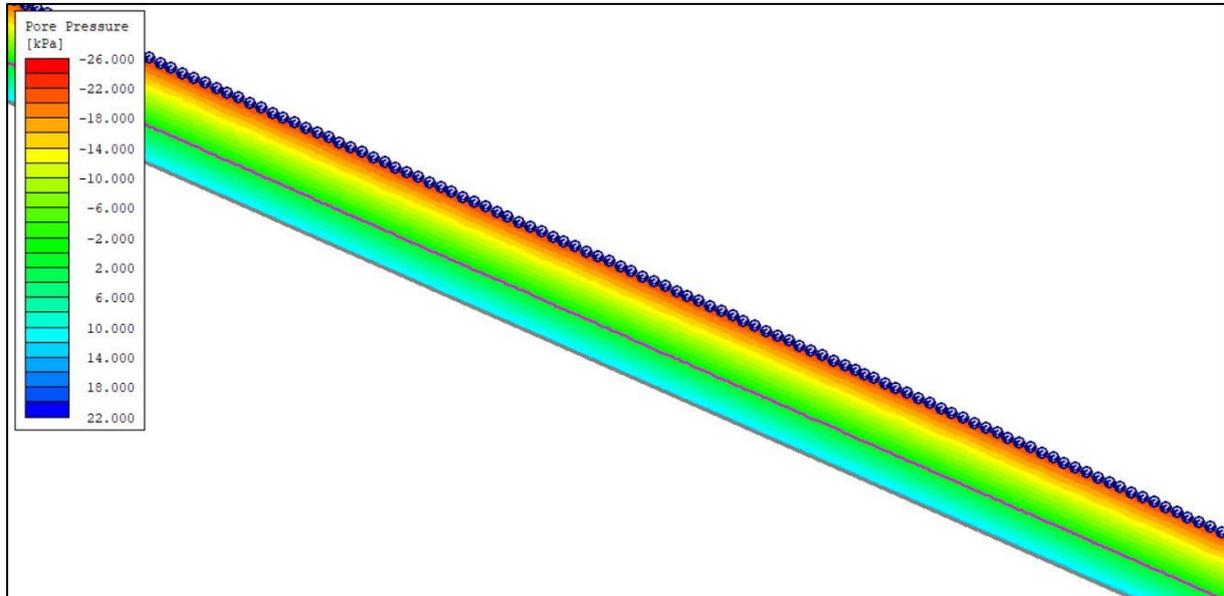


Figura 4.28: Andamento della falda idrica su versante semplificato continuo nell'ipotesi di sola filtrazione nella sezione di monte, con $A/b=42,4 \text{ m}^2/\text{m}$

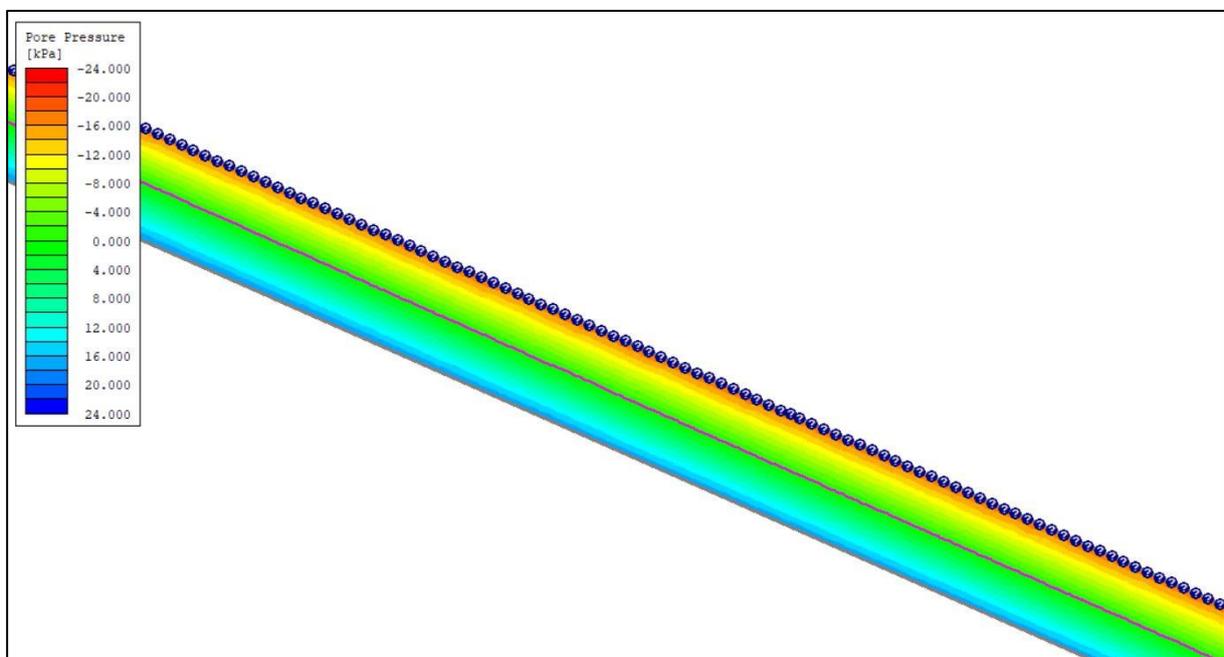


Figura 4.29: Andamento della falda idrica su versante semplificato continuo nell'ipotesi di sola filtrazione nella sezione di monte, con $A/b=200 \text{ m}^2/\text{m}$

Anche in questo caso, l'inserimento di un'intensità di ricarica distribuita lungo il versante determina un sollevamento della falda idrica con conseguente aggravamento delle condizioni

di stabilità, seppur in misura meno evidente: il fattore di sicurezza decresce da un valore di 0,86 a 0,82.

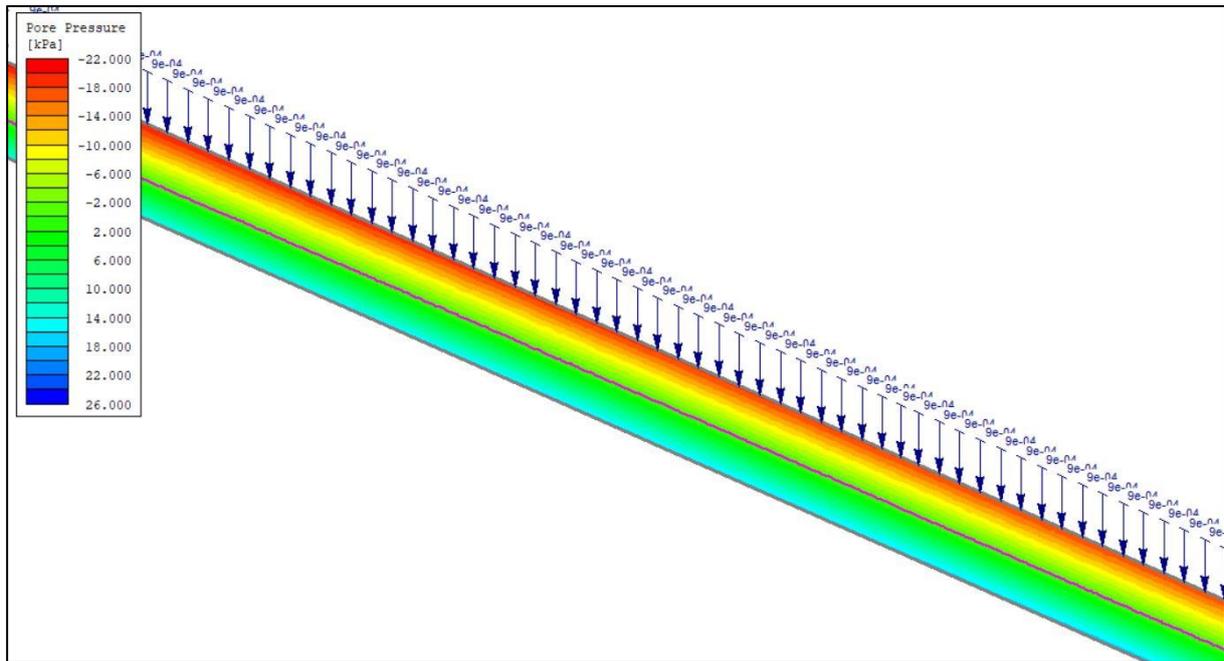


Figura 4.30: Andamento della falda idrica su versante semplificato continuo nell'ipotesi di filtrazione nella sezione di monte e infiltrazione lungo il pendio di intensità $9e-4$ m/h

4.3.2 PENDIO INTERESSATO DA DISCONTINUITÀ TOPOGRAFICA

Si è poi passati all'inserimento di un'interruzione nella continuità del pendio, della profondità di 2 metri e posto ad una distanza di 25 metri dalla sezione di monte in modo da riprodurre, in scala, il versante reale. Si nota come, così facendo, venga del tutto meno la continuità dello strato più superficiale, oggetto di analisi.

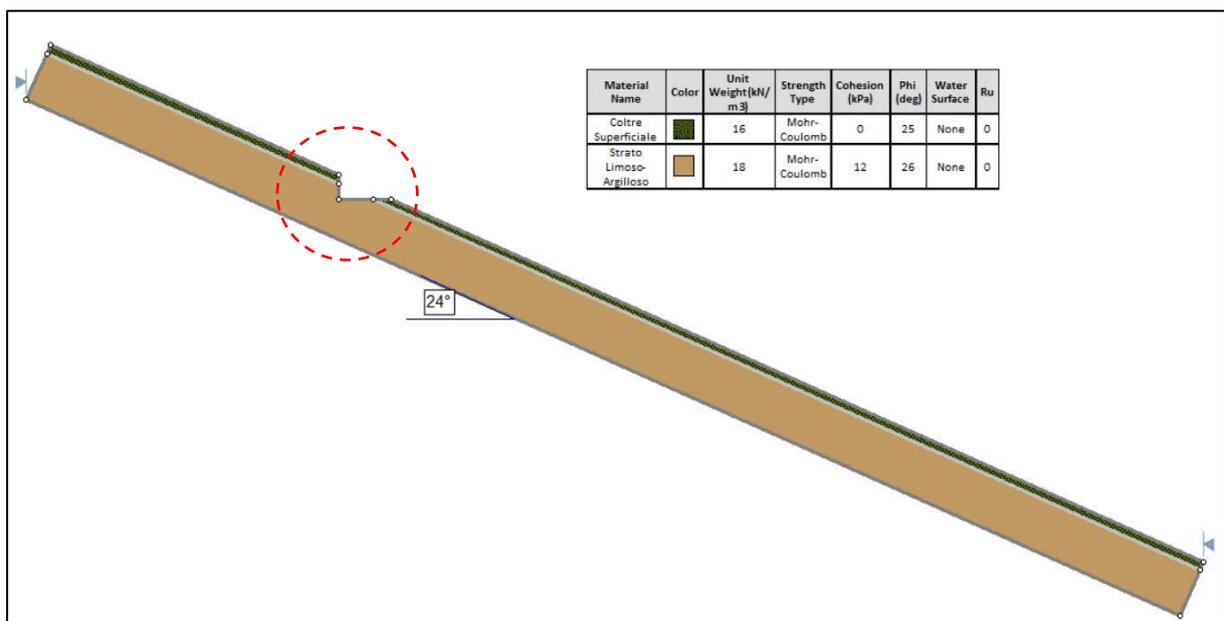


Figura 4.31: Schema di pendio discontinuo con pendenza e stratigrafia reale

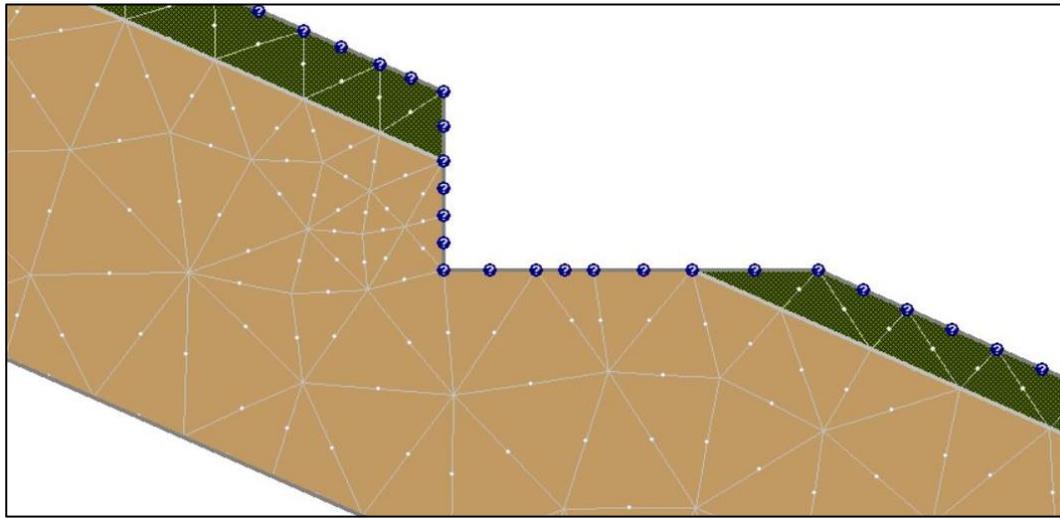


Figura 4.32: Particolare e condizioni al contorno applicate nella regione del taglio

Simulando la medesima filtrazione da monte vista per il caso di versante continuo, si assiste al fenomeno di richiamo della superficie idrica che diventa non piana, come evidenziato dagli studi di Mele et al.: nella sezione di taglio la condizione di moto uniforme è disturbata, per poi ripristinarsi più a valle.

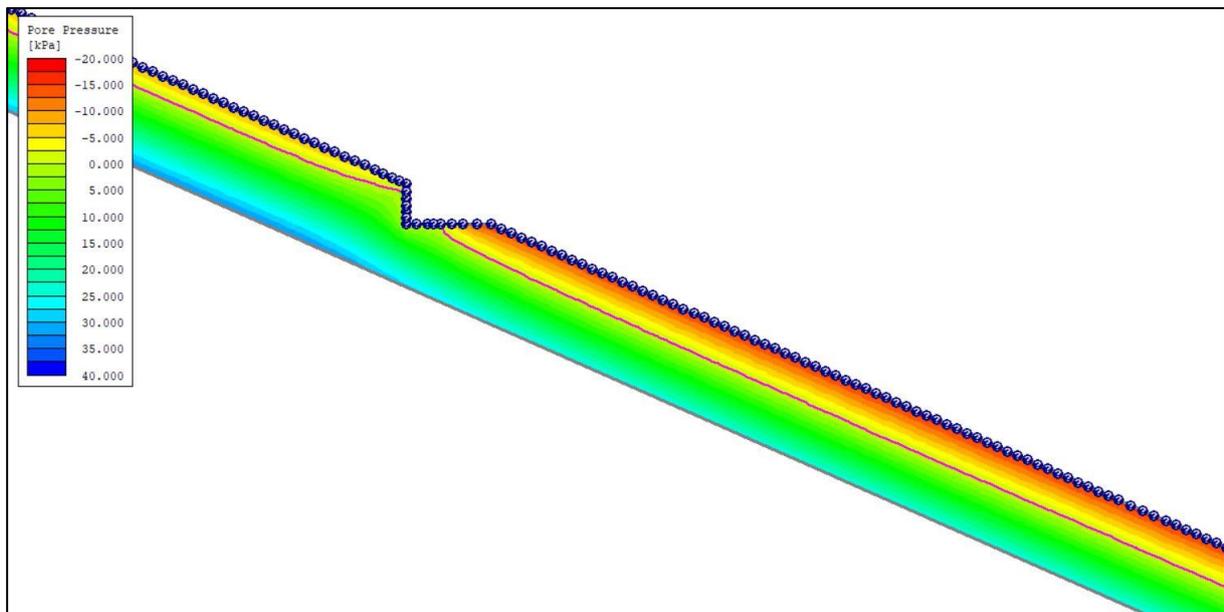


Figura 4.33: Andamento della falda idrica su versante reale discontinuo nell'ipotesi di sola filtrazione nella sezione di monte, con $A/b=42,4 \text{ m}^2/\text{m}$

È stata poi aggiunta al modello un'intensità di ricarica superficiale come fatto in precedenza, la quale determina il medesimo effetto di richiamo in corrispondenza della sezione verticale del taglio; nella porzione terminale del versante esso risulta completamente saturo, condizione evidenziata anche nel simulare il pendio continuo (Figura 4.27).

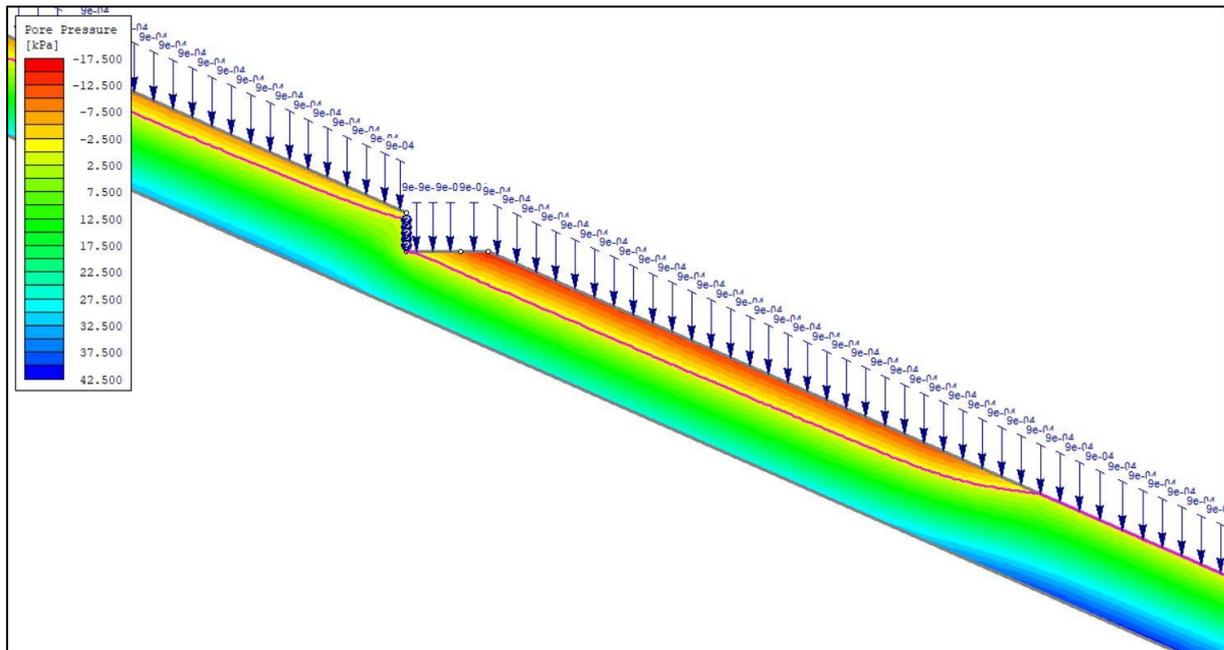


Figura 4.34: Andamento della falda idrica su versante reale discontinuo nell'ipotesi di filtrazione nella sezione di monte e infiltrazione lungo il pendio di intensità $9e-4$ m/h

Nuovamente la superficie di rottura interessa la coltre superficiale di terreno, coerentemente con quanto riscontrato negli eventi delle Langhe piemontesi.

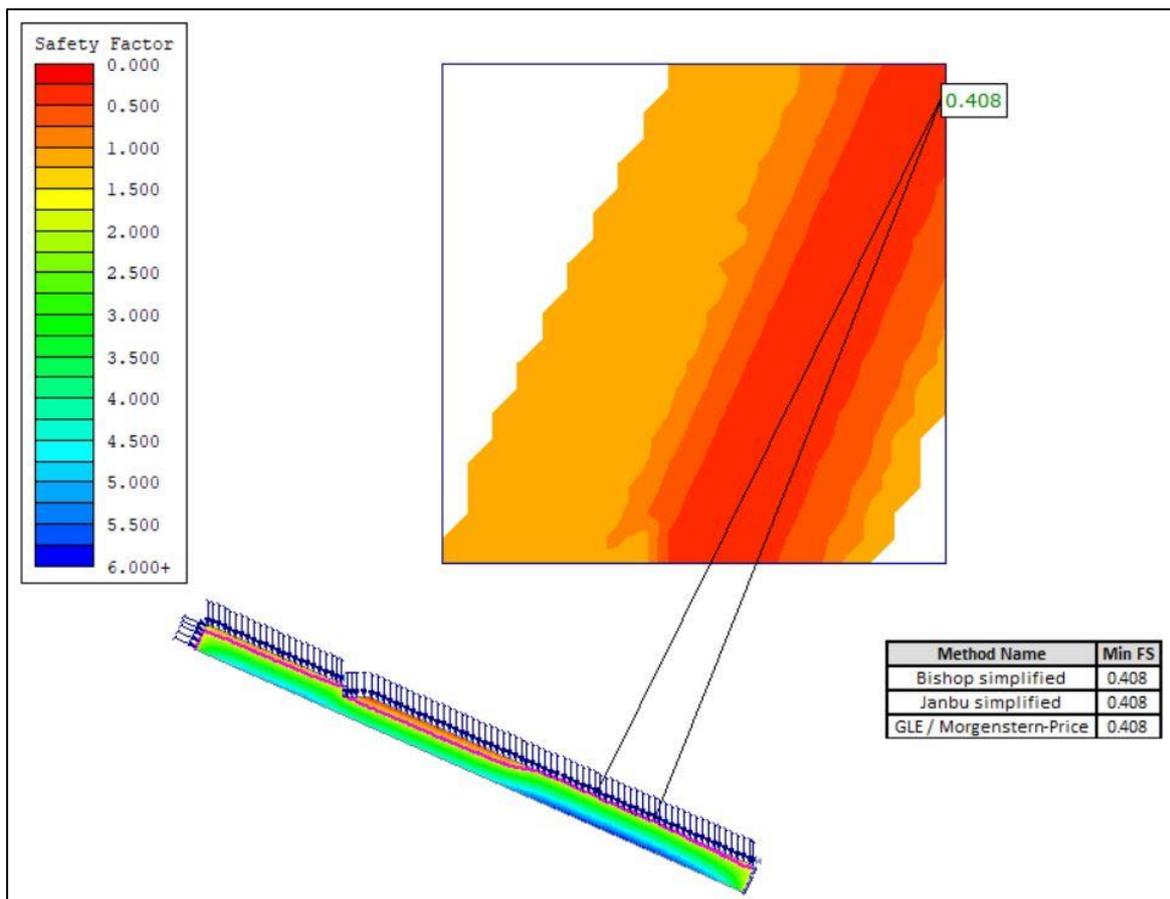


Figura 4.35: Calcolo del Fattore di Sicurezza e della superficie di scorrimento critica su versante reale discontinuo

È interessante notare come nel simulare l'andamento della superficie piezometrica in un

versante omogeneo in presenza di discontinuità il fenomeno di richiamo persista, ma in maniera molto meno evidente. Si ritiene tuttavia che tale risultato necessiti di ulteriori approfondimenti.

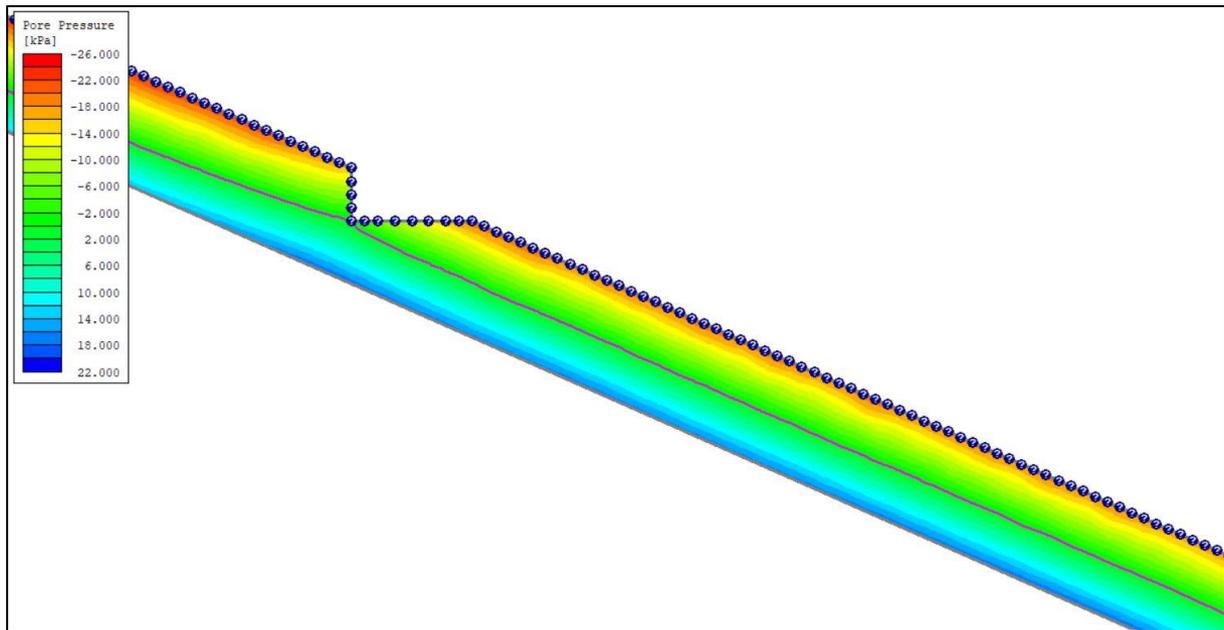


Figura 4.36: Andamento della falda idrica su versante reale discontinuo nell'ipotesi di sola filtrazione nella sezione di monte.

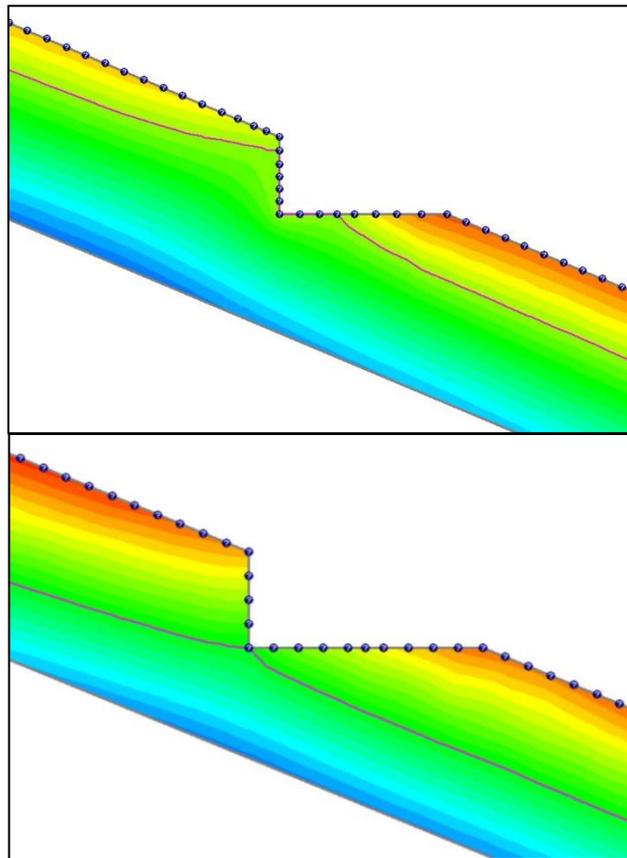


Figura 4.37: Particolare dell'andamento della falda idrica in corrispondenza della discontinuità nell'ipotesi di sola filtrazione nella sezione di monte: stratigrafia reale (in alto); stratigrafia semplificata (in basso)

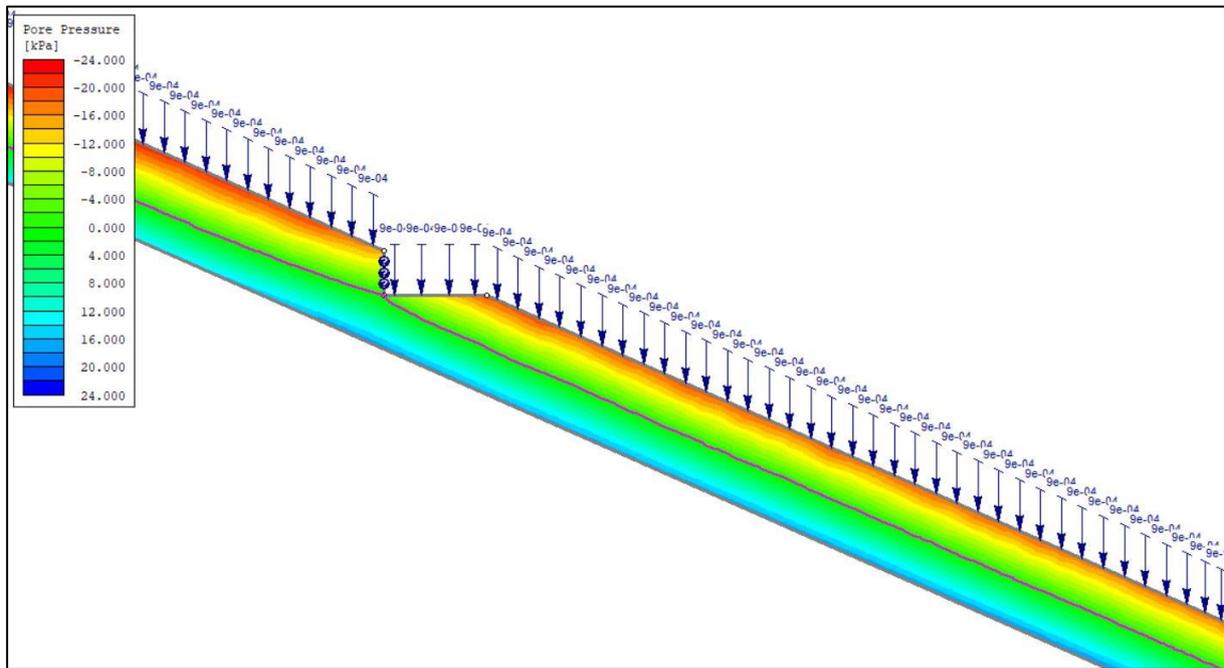


Figura 4.38: Andamento della falda idrica su versante reale discontinuo nell'ipotesi di filtrazione nella sezione di monte e infiltrazione lungo il pendio e di intensità $9e-4$ m/h

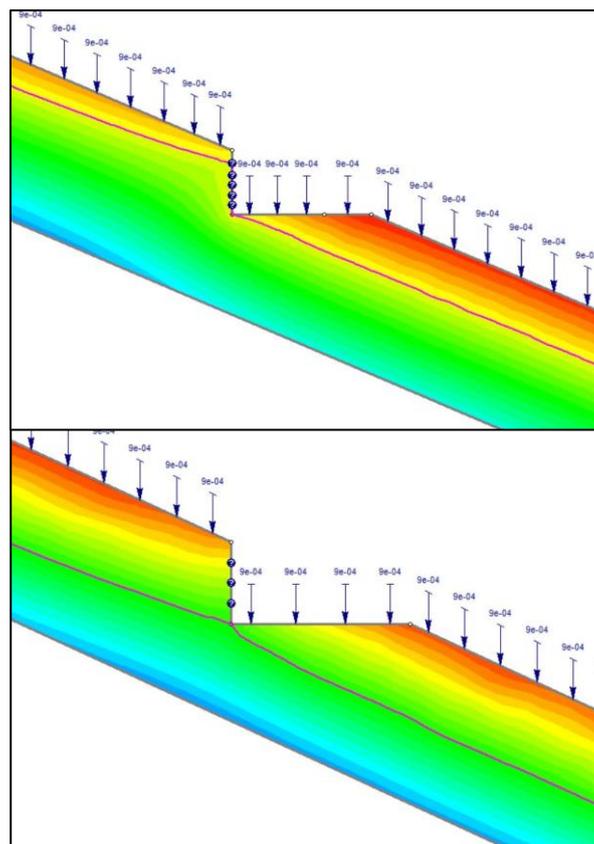


Figura 4.39: Particolare dell'andamento della falda idrica in corrispondenza della discontinuità nell'ipotesi di filtrazione nella sezione di monte e infiltrazione lungo il pendio di intensità $9e-4$ m/h: stratigrafia reale (in alto); stratigrafia semplificata (in basso)

Nel caso di terreno stratificato, la presenza di un'intensità di ricarica verticale fa variare la pressione interstiziale in maniera più consistente rispetto al caso di terreno omogeneo.

Si nota come la superficie di scorrimento, in questo caso, interessi tutto lo strato, essendo questo costituito da materiale sostanzialmente scadente, collocandosi nel tratto immediatamente a valle del taglio stradale.

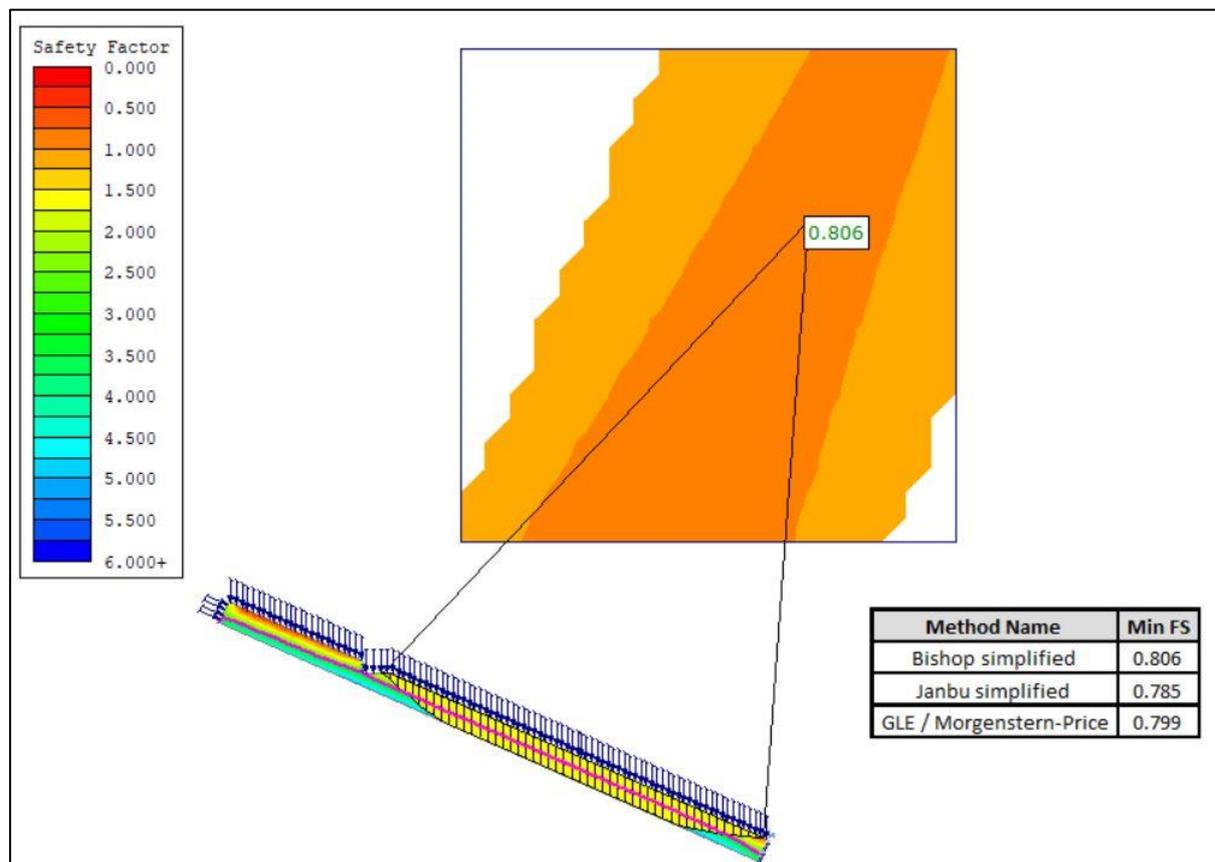


Figura 4.40: Calcolo del Fattore di Sicurezza e della superficie di scorrimento critica su versante omogeneo discontinuo

Si riportano infine i coefficienti di sicurezza derivanti dalla simulazione di ciascuno scenario:

TERRENO OMOGENEO					
PENDIO CONTINUO			PENDIO CON TAGLIO		
Asciutto	Solo filtrazione	Filtrazione + Infiltrazione	Asciutto	Solo filtrazione	Filtrazione + Infiltrazione
1,20	0,86	0,82	1,15	0,81	0,79
TERRENO STRATIFICATO					
PENDIO CONTINUO			PENDIO CON TAGLIO		
Asciutto	Solo filtrazione	Filtrazione + Infiltrazione	Asciutto	Solo filtrazione	Filtrazione + Infiltrazione
1,46	0,71	0,51	1,10	0,62	0,41

Tabella 4.10: Riepilogo dei Coefficienti di Sicurezza ottenuti da ciascuno degli scenari simulati

Si nota come questi risultino essere piuttosto bassi anche in assenza di precipitazione: ciò è probabilmente da attribuire alla procedura di taratura eseguita come descritto nel paragrafo 4.3, ovvero alla scelta di modellare in questa fase una coltre superficiale non coesiva.

Nonostante ciò, rimane evidente la caduta del fattore di sicurezza dovuta alla presenza del taglio stradale.

CONCLUSIONI

Obiettivo di questo lavoro di tesi è stata la messa a punto di una metodologia per l'analisi dei fattori chiave nei distacchi superficiali che, sia in termini di approcci esistenti che di variabili coinvolte, potesse realizzare un punto di contatto tra la modellazione concettuale idrologica e quella numerica. In particolare, si è operato ponendo l'attenzione sull'influenza delle discontinuità topografiche sulla variabilità del fattore di sicurezza.

Si è eseguita in primo luogo una disamina della vasta letteratura in ambito nazionale e internazionale inerente alle frane superficiali indotte da precipitazione, al fine di selezionare aspetti di ciascuna metodologia che tenessero conto, da un lato, della durata dell'evento pluviometrico, di chiara importanza ai fini di stabilire le condizioni di criticità, dall'altro del ruolo della morfologia del bacino in termini di distribuzione dei flussi idrologici.

Tutta l'analisi di letteratura è stata fatta ponendosi come obiettivo il fatto che l'output derivante dall'applicazione di un modello idrologico semplificato, il quale ha consentito di indagare i versanti oggetto di studio senza astrarli dai propri contesti morfologici di appartenenza, sarebbe stato poi impiegato come condizione al contorno nella successiva analisi di stabilità.

La scelta del caso studio, dettata dalla necessità di indagare casi reali, ha riguardato i fenomeni avvenuti nelle Langhe piemontesi nei giorni 5-6 novembre 1994, evento ben documentato, soffermandosi sulle caratteristiche meccaniche e idrauliche predisponenti al distacco.

Al fine di produrre casi studio che fossero caratterizzati in maniera esaustiva, ci si è occupati di verificare la disponibilità di dati geotecnici, mediante la consultazione della banca dati geotecnica di ARPA Piemonte, e pluviometrici, così come di informazioni riguardanti le geometrie dei distacchi, in particolare la distribuzione degli spessori delle coltri instabili.

Tale attività di intersezione di dati ha permesso l'estrazione di 13 distacchi, appartenenti ad un contesto litologico simile e soggetti sostanzialmente alla medesima sollecitazione meteorica. L'eterogeneità dei casi è stata dunque esaminata alla luce della presenza/assenza del taglio stradale.

Dall'analisi del vasto campione di osservazioni a disposizione risulta inoltre che l'innesco in corrispondenza di una discontinuità topografica, dovuta alla realizzazione di un sentiero e/o di una strada, costituisce uno scenario ricorrente nell'ambito degli eventi indagati.

La modellazione idrologica è stata effettuata mediante il modello di Rosso et al. (2002) su tre livelli, a crescente grado di complessità, e ha consentito di stabilire in primo luogo le condizioni di stabilità/instabilità condizionata e, di conseguenza, il livello di saturazione critico per ciascuno dei versanti indagati. La scelta di tale modello è inoltre motivata dalla volontà di indagare la relazione esistente tra superficie topografica e dinamica idrologica, essendo il bacino di drenaggio a monte di un versante uno dei parametri di input del modello in questione.

Al fine di caratterizzare correttamente la coltre superficiale interessata dai distacchi, costituita con buona probabilità da terreno rimaneggiato e molto spesso vegetato, si è proceduto alla calibrazione del modello a piccola scala con l'obiettivo di fornire una stima dei parametri efficaci al momento del distacco. Partendo dallo studio dei singoli corpi di frana e ipotizzando che la principale fonte di incertezza provenisse dai parametri di suolo, la taratura ha riguardato il valore di permeabilità satura ed il parametro geotecnico di coesione c , con il vantaggio che le due procedure risultano essere del tutto indipendenti: il valore di k_{sat} regola il deflusso all'interno dello schema di versante adottato, definendo le tempistiche di smaltimento

dell'apporto meteorico, mentre il parametro c interviene nell'analisi di stabilità meccanica, ovvero nella determinazione del fattore di sicurezza.

Per quanto riguarda la permeabilità è stato ottenuto un range di variazione, il cui limite superiore fa riferimento al cosiddetto “*bucket model*”, simulando cioè la saturazione di un vaso di capacità costante riempito dall'afflusso e svuotato dal deflusso sub-superficiale; supponendo invece che solo un'aliquota della precipitazione si sia infiltrata durante l'evento, mediante il metodo del deflusso proporzionale ψ , si è ottenuto un valore di permeabilità inferiore coerente con la dinamica reale dei processi.

La calibrazione di c è avvenuta invece modellando il momento dell'instabilizzazione (FS=0,99) ipotizzando che in quell'istante il terreno avesse raggiunto la condizione di completa saturazione.

Adottando il valore di coesione proveniente dall'operazione di taratura e un angolo di attrito interno pari a quello residuo, uno solo dei 13 casi studio risulta essere instabile anche in assenza di flussi.

La successiva implementazione del modello idrologico, prima sotto una sollecitazione meteorica standard di intensità costante pari a 10 mm/h e successivamente imponendo le condizioni pluviometriche reali, ha consentito di stabilire i tempi caratteristici necessari al raggiungimento del livello di saturazione critico. L'impiego del valore di k ottenuto con il metodo del deflusso proporzionale è stato in grado di riprodurre in maniera soddisfacente l'ora effettiva del distacco, evidenziando anche una durata critica inferiore per i versanti interessati dalla presenza del taglio.

La metodologia adottata ha mostrato come i parametri più influenti sulla stabilità della coltre siano, in primo luogo, la coesione a cui seguono la dimensione del bacino drenante a monte del versante e l'acclività.

Infine, si è ricorsi ad una modellazione agli elementi finiti mediante il software *Slide2D* fornito da *Rocscience* finalizzata alla simulazione di differenti scenari di innesco, con l'intento di riprodurre un versante il più possibile fedele alla configurazione reale. Ciò è avvalorato dall'aver imposto una condizione di flusso a monte coerente con la dimensione effettiva dell'area contribuente caratteristica del versante considerato. Il modello è costituito da una coltre superficiale dello spessore di 70 cm e da uno strato sottostante di natura limoso-argilloso spesso 4 metri.

L'estensione del modello realizzato è tale da poter ricostruire l'ipotesi di pendio indefinito, concentrandosi su ciò che accade in corrispondenza della discontinuità, in modo tale che le condizioni al contorno di valle siano sostanzialmente ininfluenti.

La simulazione è avvenuta in condizioni stazionarie, ponendosi cioè in una situazione di “stazionario equivalente” e calcolando il tempo necessario affinché il flusso percorresse l'intero versante.

L'analisi di filtrazione ha permesso innanzitutto di individuare come la superficie piezometrica subisca l'influenza delle caratteristiche idrauliche del suolo, in particolare della permeabilità: operando infatti un confronto tra la stratigrafia reale ed una semplificata omogenea interamente costituita dal materiale della coltre, si nota come, a parità di condizioni al contorno, lo strato omogeneo a permeabilità maggiore presenti un minor livello di saturazione, mentre per il terreno stratificato si evidenzia un transitorio spaziale in funzione della condizione al contorno di monte.

È emerso inoltre come l'influenza della dimensione dell'area contribuente a monte del versante si traduca in risultati differenti per il caso di terreno omogeneo e per quello stratificato.

Come anticipato in precedenza ci si è focalizzati infine sull'andamento della falda idrica in corrispondenza del taglio stradale: la modellazione ha evidenziato l'istaurarsi di un moto uniforme nel caso privo di discontinuità, verificando l'ipotesi teorica di Dupuit di falda parallela al versante, e un richiamo della stessa in presenza di taglio lungo la sua sezione verticale. Si sono riscontrati i transitori spaziali suggeriti da Mele et al. (2005), per cui la falda assume un andamento non piano.

Il fenomeno di "richiamo" da parte della superficie a pressione atmosferica del taglio permane nel caso di terreno omogeneo ma in misura decisamente meno evidente, risultato che richiede ulteriori indagini.

Le analisi di stabilità all'equilibrio limite hanno permesso di determinare il valore numerico del fattore di sicurezza e di individuare le superfici di scivolamento critico che, nel caso di stratigrafia reale, si collocano effettivamente all'interno della coltre superficiale.

Si è evidenziata una diminuzione del fattore di sicurezza globale nel passaggio dalla condizione di pendio completamente asciutto a pendio soggetto ad un'intensità di ricarica verticale e, ancor più, analizzando il caso di pendio discontinuo. I valori del fattore di sicurezza ottenuti a seguito dell'operazione di taratura risultano essere piuttosto bassi: tale risultato è probabilmente dovuto alla scelta di modellare in questa fase una coltre superficiale priva di coesione.

BIBLIOGRAFIA

- Barbero S., Marchisio C. 1998. L'evento alluvionale del 2-6 novembre 1994. In: Eventi alluvionali in Piemonte, 42-53, Regione Piemonte, Torino.
- Barling R.D., Moore I.D., Grayson R.B. 1994. A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content. *Water Resources Research*, 30, 1029-1044.
- Beven K. 1981. Kinematic subsurface streamflow. *Water Resources Research*, 17, 1419-1424.
- Borga M., Dalla Fontana G., Da Ros D., Marchi L. 1998. Shallow landslide hazard assessment using a physically based model and digital elevation data. *Environmental Geology*, 35, 81-88.
- Borga M., Dalla Fontana G., Cazorzi F. 2002. Analysis of topographic and climatic control on rainfall-triggered shallow landsliding using a quasi-dynamic wetness index. *Journal of Hydrology*, 268, 56-71.
- Borga M., Dalla Fontana G., Gregoretto C., Marchi L. 2002. Assessment of shallow landsliding by using a physically based model of hillslope stability. *Hydrol. Process.*, 16, 2833-2851.
- Borga M., Tonelli F., Salleroni J. 2004. A physically based model of the effects of forest roads on slope stability. *Water Resources Research*, 40, W12202.
- Borga M., Tonelli F., Dalla Fontana G., Cazorzi F. 2005. Evaluating the influence of forest roads on shallow landsliding. *Ecological Modelling*, 187, 85-98.
- Buonocore R. 2018. Interazione tra modello geotecnico ed idrologico sulle condizioni di innesco delle frane superficiali. Politecnico di Torino, Tesi di Laurea Magistrale.
- Campus S., Nicolò G., Rabuffetti D. 2005. Le frane riguardanti la coltre superficiale. In: Dalla valutazione alla previsione dei rischi naturali, 89-98, ARPA Piemonte.
- Campus S., Forlati, F., Susella, G., Tamberlani, F. 1998. Frane per mobilitazione delle coperture detritiche. In: Eventi alluvionali in Piemonte, 266-287, Regione Piemonte, Torino.
- Chirico G.B., Grayson R.B., Western A.W. 2003. On the computation of the quasi-dynamic wetness index with multiple-flow-direction algorithms. *Water Resources Research*, 39.
- Colombo A., Ramasco M. 2007. Analisi del dissesto da frana in Piemonte. In: Rapporto sulle frane in Italia, 78, 81-120.
- Cordano E., Rigon R. 2008. A perturbative view on the subsurface water pressure response at hillslope scale. *Water Resources Research*, 44, W05407.
- Capparelli G., Versace P. 2014. Analysis of landslide triggering conditions in the Sarno area using a physically based model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 3225-3237.
- Cascini L., Cuomo S., Pastor M. 2008. The role played by mountain tracks on rainfall induced shallow landslides: a case study. *International Congress on Environmental Modelling and Software*, 206.
- Cruden D.M. 1991. A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27-29.

- Di Crescenzo G., De Falco M., Iervolino V.M., Rinaldi S., Santangelo N., Santo A. 2008. Proposal of a new semiquantitative methodology for flowslides triggering susceptibility assessment in the carbonate slope contexts of Campania (southern Italy). *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 1.
- Di Crescenzo G., Santo A. 2005. Nuovo contributo sul ruolo svolto dai livelli pomicei nelle aree di distacco delle frane di colata rapida dei massicci carbonatici campani. In: *La mitigazione del rischio da colate di fango a Sarno e negli altri comuni colpiti dagli eventi del maggio 1998*.
- Dunne T., Black R.D. 1970. An experimental investigation of runoff production in permeable soil. *Water Resources Research*, 6, 478-490.
- Dunne T., Moore T.R., Taylor C.H. 1975. Recognition and prediction of runoff producing zones in humid regions. *Hydrological Sciences Bulletin*, 20, 305-327.
- Evangelista A., Nicotera A.M.V., Scotto Di Santolo A. 2005. Valutazione del ruolo degli strati pomicei nell'insacco dei fenomeni di colate di fango. In: *La mitigazione del rischio da colate di fango a Sarno e negli altri comuni colpiti dagli eventi del maggio 1998*.
- Formetta G., Simoni S., Godt J.W., Lu N., Rigon R. 2016. Geomorphological control on variably saturated hillslope hydrology and slope instability. *Water Resources Research*, 52, 4590–4607.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H. 1993. *Soil Mechanics for unsaturated Soils*. John Wiley & Sons.
- Fredlund D.G., Xing A., Fredlund M.D., Barbour S.L. 1996. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve, *Can. Geotech. J.*, 33, 440–448.
- Grabs, T., Seibert J., Bishop K., Laudon H. 2009. Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model. *Journal of Hydrology*, 373, 15–23.
- Greco R., Comegna L., Damiano E., Guida A., Olivares L., Picarelli L. 2014. IDRA14 Aspetti idrologici e idraulici per il controllo dei movimenti franosi.
- Guadagno F.M., Martino S., Scarascia Mugnozza G. 2002. Influence of man-made cuts on the stability of pyroclastic covers (Campania, southern Italy): a numerical modelling approach. *Environmental Geology*, 43, 371–384.
- Guadagno F.M., Forte R., Revellino P., Fiorillo F., Focareta M. 2005. Some aspects of the initiation of debris avalanches in the Campania Region: The role of morphological slope discontinuities and the development of failure. *Geomorphology*, 66, 237–254.
- Iverson R.M. 2000. Landslides triggered by rainfall. *Water Resources Research*, 36, 1897-1910.
- Lanni C. 2012. Hydrological controls on the triggering of shallow landslides: from local to landscape scale. Università di Trento. Tesi di Dottorato.
- Lu N., Sener Kaya B., Godt J.W. 2011. Direction of unsaturated flow in a homogeneous and isotropic hillslope. *Water Resources Research*, 47.
- Lu N., Sener Kaya B., Wayllace A., Godt J.W. 2012. Analysis of rainfall-induced slope instability using a field of local factor of safety. *Water Resources Research*, 48.
- Mancini M., Rosso R., Rulli M.C. Soglie pluviali di frana superficiale, *Il servizio di piena*, 101-108.

- Mele G., Basile A., De Mascellis R., Terribile F. 2005. I tagli stradali come fattore d'innesco delle colate rapide di fango in Campania: simulazione 2D del bilancio idrico nel suolo. In: La mitigazione del rischio da colate di fango a Sarno e negli altri comuni colpiti dagli eventi del maggio 1998.
- Montgomery D.R., Dietrich W.E. 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30, 1153-1171.
- Montrasio L., Valentino R. 2008. A model for triggering mechanisms of shallow landslides. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 1149-1159.
- Montrasio L., Valentino R., Losi G. 2009. Rainfall-induced shallow landslides: a model for the triggering mechanism of some case studies in Northern Italy. *Landslides*, 6, 241-251.
- Montrasio L., Valentino R. 2016. Modelling rainfall-induced shallow landslides at different scales using SLIP_Part 1. *Procedia Engineering* 158, 476-481.
- Montrasio L., Valentino R. 2016. Modelling rainfall-induced shallow landslides at different scales using SLIP_Part 2. *Procedia Engineering* 158, 482-486.
- O'Callaghan J., Mark D. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation models. *Computer Vision Graphics and Image Processing*, 28, 323-344.
- O'Loughlin E.M. 1981. Saturation regions in catchment and their relations to soil and topographic properties. *Journal of Hydrology*, 53, 229-246.
- O'Loughlin E.M. 1986. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*, 22, 794-804.
- Quinn P.F, Beven K.J, Chevallier P., Planchon O. 1991. The prediction of hillslope flowpaths for distributed modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5, 59-80.
- Regione Piemonte, Scuola Universitaria professionale della Svizzera Italiana, Istituto di scienze della Terra. Programma Interreg. 1999. Definizione di una metodologia per la valutazione dell'instabilità dei versanti in relazione a processi di mobilitazione della coltre superficiale.
- Reid M.E., Iverson R.M. 1992. Gravity-driven groundwater flow and slope failure potential. Effects of slope morphology, material properties, and hydraulic heterogeneity. *Water Resources Research*, 28, 939-950.
- Reid M.E. 1997. Slope instability caused by small variations in hydraulic conductivity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123,08.
- Rigon R., Bertoldi G., Over T.M. 2006. GEOtop: A Distributed Hydrological Model with Coupled Water and Energy Budgets. *Journal of Hydrometeorology*, 7, 371-388.
- Rocscience Inc. 2002. Slide2D User's Guide.
- Rosso R., Rulli M.C., Vannucchi G. 2006. A physically based model for the hydrologic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 42.
- Sidle R.C., Pearce A.J., O' Loughlin C.L. 1985. Hillslope instability and land use. *Water Resources Monograph*, 11.
- Simoni S., Zanotti F., Bertoldi G., Rigon R. 2008. Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flows using GEOtop-FS. *Hydrological Processes: An International Journal* 22, 532-545.

Tarboton D.G. 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33, 309-319.

Tiso C., Bertoldi G., Rigon R. 2004. The model GEOTOP-SF to forecast the triggering of slopes and debris flow instability. *Internationales Symposium. INTERPRAEVENT 2004-RIVA/TRIENT*.

Varnes D.J. 1978. Slope movement types and process. In: *Landslides: Analysis and Control* Transportation Research Board, Special Report. National Research Council, Washington D.C., 11–33.

Zizioli D., Meisina C., Montrasio L., Valentino R. 2013. Comparison between different approaches to modeling shallow landslide susceptibility: a case history in Oltrepo Pavese, Northern Italy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 559–573.

Siti Web:

Geoportale Regione Piemonte:

<https://www.geoportale.piemonte.it/cms/>

Geoportale Arpa Piemonte:

<https://webgis.arpa.piemonte.it/geoportale/>

Piemonte SIFRAP – Sistema Informativo dei fenomeni franosi:

https://webgis.arpa.piemonte.it/Geoviewer2D/?config=other-configs/SIFRAP_config.json

ALLEGATO 1: CAMPIONE DI OSSERVAZIONI

Distacchi da 1 a 60

CODICE	STRISCIATA	FOTOGRAMMA	COMUNE	LOCALITA	SEZ_CTR	TIPO_FRANA	DESCR_ORLO
1	46A	5201	Lequio Berria	C.na Castagnotti	193140	A	
2	46A	5201	Lequio Berria	C.na Castagnotti	193140	B	
3	46A	5201	Lequio Berria	C.na Castagnotti	193140	A	
4	46A	5201	Lequio Berria	Lequio Berria	193140	A	
5	46A	5201	Lequio Berria	Lequio Berria	193140	A	
6	46A	5201	Lequio Berria	Lequio Berria	193140	A	
7	46A	5201	Lequio Berria	Lequio Berria	193140	A	
8	46A	5201	Lequio Berria	Lequio Berria	193140	A	
9	46A	5201	Lequio Berria	Cimitero	193140	A	
10	46A	5201	Lequio Berria	Cimitero	193140	A	
11	46A	5201	Lequio Berria	C.na Vori	193140	A	
12	46A	5201	Lequio Berria	C.na Vori	193140	A	
13	46A	5201	Lequio Berria	C.na Vori	193140	A	
14	46A	5201	Lequio Berria	C.na Vori	193140	A	
15	46A	5201	Cerreto Langhe	C.na Paroldo	211020	A	
16	53	6062	Feisoglio	Sprella	211060	A	
17	46A	5201	Lequio Berria	C.na Vori	193140	A	Piazzale
18	46A	5201	Lequio Berria	C.na Vori	193140	A	Piazzale
19	46A	5201	Lequio Berria	C.na Vori	193140	A	Piazzale
20	46A	5201	Lequio Berria	Tra Tre Cunei e Lequio	193140	A	
21	46A	5201	Lequio Berria	Tra Tre Cunei e Lequio	193140	B	
22	46A	5201	Lequio Berria	Tra Tre Cunei e Lequio	211020	A	
23	46A	5201	Arguello	Tre Cunei	211020	A	Cortile
24	46A	5201	Arguello	Tre Cunei	211020	A	
25	46A	5201	Arguello	Tre Cunei	211020	A	
26	46A	5201	Arguello	Bric S.Michele - Arguello	211020	C	
27	46A	5201	Arguello	Bric S.Michele	211020	A	
28	46A	5201	Arguello	Bric S.Michele	211020	C	
29	46A	5201	Arguello	Bric S.Michele	211020	D	
30	46A	5201	Arguello	Bric S.Michele	211020	B	
31	46A	5201	Arguello	C.na Bricco	211020	A	
32	46A	5201	Arguello	C.na Bricco	211020	B	
33	46A	5201	Arguello	C.na Bricco	211020	A	
34	46A	5201	Arguello	C.na Bricco	211020	A	
35	46A	5201	Arguello	C.na Bricco	211020	A	
36	46A	5201	Arguello	C.na Bricco	211020	A	
37	46A	5201	Arguello	C.na Bricco	211020	A	
38	46A	5201	Arguello	C.na Bricco	211020	A	Cortile (terreno ghiaioso di riporto)
39	46A	5201	Arguello	Arguello	211020	C	
40	46A	5201	Arguello	Arguello	211020	A	
41	46A	5201	Lequio Berria	Bric Ciliegia-versante S	193140	A	
42	46A	5201	Lequio Berria	Bric Ciliegia-versante S	211020	A	Scarpata stradale

43	46A	5201	Lequio Berria	Bric Ciliegia-versante S	211020	A	Scarpata stradale
44	46A	5201	Lequio Berria	Bric Ciliegia-versante S	211020	B	Scarpata stradale
45	46A	5201	Lequio Berria	Bric Ciliegia-versante S	211020	A	Scarpata stradale
46	46A	5201	Lequio Berria	Bric Ciliegia-versante S	211020	C	
47	46A	5201	Lequio Berria	Bric Ciliegia-versante S	211020	A	
48	46A	5201	Lequio Berria	Bric Ciliegia-versante S	211020	A	
49	46A	5201	Lequio Berria	Bric Ciliegia-versante S	211020	A	Pendio a tergo di edificio
50	46A	5201	Lequio Berria	Villa	193140	A	
51	46A	5201	Lequio Berria	Villa	193140	A	
52	46A	5201	Lequio Berria	C.na S.Caterina	193140	A	
53	46A	5201	Lequio Berria	C.na S.Caterina	193140	A	
54	46A	5201	Lequio Berria	C.na S.Caterina	193140	A	
55	46A	5201	Lequio Berria	C.na S.Caterina	193140	A	
56	46A	5201	Lequio Berria	C.na S.Caterina	193140	A	
57	46A	5201	Lequio Berria	C.na S.Caterina	193140	C	
58	46A	5201	Lequio Berria	C.na S.Caterina	193140	A	
59	46A	5201	Lequio Berria	C.na Valcrosa	193140	A	Strada
60	46A	5201	Lequio Berria	C.na Bruna	211020	B	Strada

PEND_A B	PEND_B C	PEND_A C	Pend (BC-AB)	GEOM_ L	GEOM_ D	GEOM_ H	USO_SUO LO	GG_DISTACC	ORA_
15	45		30	7,5	14,0	1,3	1	05/11/1994	13.00
22	30		8	9,0	13,5	1,0	1	05/11/1994	12.30
22	45		23	9,0	22,0	1,0	1	05/11/1994	12.30
10	32		22	21,0	8,5	1,0	5		
0	40		40	10,0	7,0	1,0	3	05/11/1994	18.30
0	40		40	7,0	10,0	1,5	3	05/11/1994	9.30
5	40		35	15,5	17,0	1,7	5	06/11/1994	0.00
0	48		48	10,0	7,0	0,8	6	05/11/1994	9.30
9	49		40	6,0	14,0	1,0	6	05/11/1994	14.00
5	49		44	7,0	19,0	0,9	6	05/11/1994	14.00
10	43		33	3,7	5,2	0,5	1		
12	47		35	7,5	16,0	1,1	1		
35	45		10	4,5	5,0	0,8	6		
25	80		55	4,0	20,0	0,5	1	05/11/1994	9.00
19	64		45	20,0	43,0	2,0	4	05/11/1994	15.00
25	43		18	7,0	9,0	1,0	6	05/11/1994	19.00
2	40		38	8,5	5,5	0,6	6	05/11/1994	20.00
2	40		38	10,0	5,0	0,5	6	06/11/1994	8.00
3	42		39	10,0	6,0	0,7	6	06/11/1994	8.00
5	42		37	6,0	21,0	1,2	6		
3	45		42	6,5	19,0	1,5	6	05/11/1994	17.30
5	52		47	4,0	11,0	1,0	6		
2	43		41	9,0	28,0	1,0	1		
4	41		37	10,0	12,0	1,5	6	06/11/1994	0.00
5	45		40	4,5	9,0	0,7	3		
		45		5,0	12,0	1,0	6		
5	35		30	10,0	11,0	0,0	3		
		38		19,0	16,0	1,0	3		

		34		10,0	35,0	1,0	3		
4	47		43	10,0	18,0	1,0	3	06/11/1994	0.00
20	42		22	3,5	12,0	0,7	4	05/11/1994	17.00
22	57		35	3,0	25,0	1,0	6	05/11/1994	16.30
4	44		40	7,0	28,0	1,2	6	05/11/1994	16.30
28	50		22	4,0	22,0	0,5	5	05/11/1994	18.30
31	80		49	2,5	12,0	0,5	6	05/11/1994	10.30
11	80		69	0,0	40,0	0,6	1		
3	36		33	4,0	7,5	0,6	6		
3	35		32	14,0	32,0	1,5	3		
		36		6,0	13,0	1,0	3		
0	44		44	5,0	19,0	1,6	6		
12	23		11	20,0	12,0	0,5	1		
15	52		37	3,0	7,0	0,4	1		
15	52		37	3,5	4,5	0,7	1		
29	41		12	11,0	25,0	0,6	1		
19	43		24	4,5	24,0	1,1	1		
		29		5,0	4,0	0,5	5		
24	85		61	10,0	5,5	0,9	6		
17	75		58	6,5	19,0	0,6	5		
13	80		67	7,0	24,5	1,0	1		
15	52		37	6,0	27,0	1,0	3		
20	48		28	0,0	0,0	10,0	1	05/11/1994	17.00
14	40		26	6,5	23,0	0,7	5	05/11/1994	15.30
11	39		28	3,5	23,5	1,7	2		
15	55		40	6,5	75,0	1,0	1		
32	42		10	6,5	11,0	0,5	6		
11	82		71	8,5	2,5	1,3	2		
		34		9,0	17,0	0,7	2	05/11/1994	11.30
16	38		22	5,3	14,5	0,5	2	05/11/1994	20.30
14	39		25	6,0	7,0	0,7	1	05/11/1994	15.30
22	62		40	6,1	57,0	2,0	1	05/11/1994	14.00

Distacchi da 61 a 120

CODICE	STRISCIATA	FOTOGRAMMA	COMUNE	LOCALITA	SEZ_CTR	TIPO_FRANA	DESCR_ORLO
61	46A	5201	Lequio Berria	Case La Bruna	211020	A	
62	46A	5201	Lequio Berria	Case La Bruna	211020	A	Muro a secco
63	46A	5201	Lequio Berria	C.na Castagnotti	193140	A	
64	46A	5201	Lequio Berria	C.na Castagnotti	193140	A	Muro a secco a metà scarpata
65	46A	5201	Lequio Berria	C.na Castagnotti	193140	B	
66	46A	5201	Lequio Berria	C.na Castagnotti	193140	B	
67	46A	5201	Lequio Berria	C.na Castagnotti	193140	A	
68	46A	5201	Arguello	C.na Buffalora	211020	A	
69	46A	5201	Arguello	C.na Buffalora	211020	A	
70	46A	5201	Arguello	C.na Buffalora	211020	A	
75	47	6151	Monforte d'Alba	S.Giuseppe	210040	A	
76	47	6151	Monforte d'Alba	S.Giuseppe	210040	A	

77	47	6151	Monforte d'Alba	S.Giuseppe	210040	A	Scarpata a monte strada
78	47	6147	Cerreto Langhe	Langhe	211010	A	
79	47	6147	Cerreto Langhe	Langhe	211010	A	
80	47	6147	Cerreto Langhe	Langhe	211010	A	
81	47	6149	Serravalle Langhe	Serravalle Langhe	211010	A	Scarpata a monte di una strada
82	47	6149	Serravalle Langhe	Serravalle Langhe	211010	B	
83	47	6149	Serravalle Langhe	Serravalle Langhe	211010	A	
84	46A	5199	Cerreto Langhe	Cerretta	211010	A	
85	46A	5199	Cerreto Langhe	Cerretta	211010	A	
86	46A	5199	Albaretto della Torre	Tra C.Cappella e Borine	193130	A	A monte strada
87	46A	5199	Albaretto della Torre	Tra C.Cappella e Borine	193130	A	A monte strada
88	46A	5199	Albaretto della Torre	Tra Borine e C.Cappella	193130	A	Scavo per le case
89	42A	5005	Alba	Case Sparse 7 (Torre)	193050	B	
90	42A	5005	Alba	Torre	193050	A	
91	42A	5005	Alba	Torre	193050	C	
92	42A	5006	Guarene	C.Rolanda	193050	A	
93	42A	5006	Guarene	Guarene	193050	A	
94	42A	5006	Guarene	Guarene	193050	C	
95	42A	5010	Neive	Gavello	193060	C	
96	42A	5010	Neive	Gavello	193060	C	
97	42A	5010	Neive	Gavello	193060	A	
98	42A	5010	Neive	Gavello	193060	C	
99	42A	5011	Neive	Moniprandi	193060	A	
100	42A	5011	Neive	Moniprandi	193060	A	
101	42A	5011	Neive	Moniprandi	193060	A	
102	43A	5064	Treiso	C.Montarano	193090	C	
103	43A	5064	Treiso	C.Montarano	193090	A	
104	43A	5064	Treiso	C.Montarano	193090	A	
105	43A	5062	Neviglie	C.Tinella	193060	C	
106	43A	5062	Neviglie	C.Tinella	193060	C	
107	43A	5062	Neviglie	C.Tinella	193060	C	
108	43A	5061	Mango	Mango	193100	A	A monte della strada
109	43A	5061	Mango	C.Isacco	193100	C	
110	43A	5061	Mango	Madonna delle Grazie	193100	A	
111	43A	5058	Cossano Belbo	C.Mattia	193110	A	
112	43A	5058	Cossano Belbo	C.Mattia	193110	A	Riporto - muro a secco
113	54	6158	Camerana	Scraveiri	211130	A	
114	54	6158	Camerana	Scraveiri	211130	A	
115	54	6158	Camerana	Scraveiri	211130	A	
116	54	6162	Paroldo	Costaricca	211130	A	
117	54	6162	Paroldo	Costaricca	211130	A	
118	54	6162	Paroldo	Costaricca	211130	C	
119	54	6162	Paroldo	Costaricca	211130	C	
120	54	6164	Torresina	Torresina	211130	A	A lato c'è muro a secco

PEND_A B	PEND_B C	PEND_A C	Pend (BC-AB)	GEOM_ L	GEOM_ D	GEOM_ H	USO_SUOL O	GG_DISTACC	ORA_
20	35		15	5,5	29,0	0,7	2	05/11/1994	15.30

4	44		40	22,0	19,0	1,0	2	05/11/1994	20.00
42	20		-22	7,2	11,5	0,7	1	05/11/1994	8.30
13	80		67	4,5	9,0	1,2	1	05/11/1994	8.30
13	38		25	11,5	17,5	1,0	1	05/11/1994	8.30
5	55		50	0,9	40,0	0,0	2	05/11/1994	8.30
7	45		38	9,3	8,0	1,0	2	05/11/1994	8.30
2	35		33	8,0	3,0	1,5	6	06/11/1994	16.00
5	37		32	6,5	10,5	0,9	6	07/11/1994	0.00
2	35		33	6,0	4,0	1,1	6		
15	49		34	10,0	8,0	1,0	4	05/11/1994	20.00
29	56		27	4,3	20,0	0,6	6	05/11/1994	8.00
14	50		36	3,4	12,0	0,6	4		
21	50		29	5,0	33,0	1,3	5	05/11/1994	20.30
11	53		42	6,6	0,0	1,6	1	05/11/1994	20.30
18	49		31	7,0	33,0	1,5	1	05/11/1994	20.30
23	76		53	6,4	34,0	1,0	6	05/11/1994	21.00
3	45		42	8,0	37,0	0,6	6	05/11/1994	21.00
14	53		39	4,0	0,0	0,7	1	05/11/1994	21.00
6	41		35	6,5	11,7	1,0	5	05/11/1994	23.00
13	39		26	12,0	30,0	2,0	1		
13	60		47	4,5	25,0	0,8	1	05/11/1994	8.30
27	65		38	5,7	14,5	1,0	1	05/11/1994	8.30
11	54		43	7,3	36,0	1,0	5	05/11/1994	19.00
17	33		16	10,0	27,0	0,6	4	06/11/1994	0.00
24	49		25	4,8	31,0	0,9	4		
		28	0	11,0	17,0	0,8	5	06/11/1994	0.00
33	41		8	9,0	23,0	2,0	3	06/11/1994	1.00
17	64		47	2,8	92,0	0,5	5	05/11/1994	9.00
		26	0	20,0	38,0	1,0	5	05/11/1994	22.00
		26	0	17,0	24,0	2,0	4	05/11/1994	19.30
		27	0	16,0	22,0	1,0	4	05/11/1994	18.00
19	50		31	6,0	64,0	1,0	1	05/11/1994	19.15
		28	0	12,0	44,0	0,9	4	05/11/1994	17.15
0	62		62	3,5	33,0	1,3	4	06/11/1994	9.00
12	50		38	4,5	20,0	1,0	4	06/11/1994	0.00
10	49		39	8,5	36,0	1,0	6	06/11/1994	0.00
		30	0	8,0	22,0	1,2	5	05/11/1994	20.30
23	38		15	3,8	31,0	0,5	5	05/11/1994	20.00
24	56		32	5,5	64,0	1,3	4	05/11/1994	20.00
		31	0	18,0	14,5	1,0	4	05/11/1994	19.00
		28	0	9,0	13,0	0,8	6	05/11/1994	19.00
		30	0	5,2	8,5	0,7	4	05/11/1994	19.00
11	52		41	6,8	21,5	1,2	2	05/11/1994	10.00
		31	0	9,0	10,0	1,0	1	05/11/1994	15.00
9	50		41	13,0	7,0	0,8	4	05/11/1994	17.30
7	60		53	5,5	5,2	0,8	6	05/11/1994	8.50
17	58		41	3,0	12,5	0,7	4		
2	48		46	49,0	12,0	1,5	6	05/11/1994	21.00
14	43		29	11,0	16,5	1,2	5		
0	48		48	6,0	14,0	1,1	6		

23	53		30	6,5	57,0	1,0	1	06/11/1994	0.00
21	40		19	20,0	37,0	1,0	1	06/11/1994	0.00
		25	0	12,0	32,0	1,2	1	06/11/1994	0.00
		25	0	30,0	4,0	0,7	1	06/11/1994	0.00
7	90		83	3,6	25,0	0,9	3		

Distacchi da 121 a 180

CODICE	STRISCIATA	FOTOGRAMMA	COMUNE	LOCALITA	SEZ_CTR	TIPO_FRANA	DESCR_ORLO
121	54	6164	Torresina	Torresina	211130	A	Con muri a secco laterali
122	54	6164	Torresina	Torresina	211130	A	Con muro a secco
123	54	6166	Castellino Tanaro	Grandis	210160	A	Scarpata a monte strada provinciale
124	54	6166	Castellino Tanaro	Castellino Tanaro	210160	C	
125	54	6166	Castellino Tanaro	Castellino Tanaro	210160	A	A monte strada
126	54	6166	Castellino Tanaro	Castellino Tanaro	210160	A	Stradale
127	53	6084	Marsaglia	S.Bernardo	210160	A	
128	53	6084	Marsaglia	S.Bernardo	210160	C	
129	53	6084	Marsaglia	S.Bernardo	210160	A	
130	53	6084	Marsaglia	S.Bernardo	210160	A	
131	53	6081	Murazzano	C.na Bocciardi	211090	A	Scavo strada agricola
132	53	6081	Murazzano	C.na Bocciardi	211090	A	
133	53	6081	Murazzano	C.na Bocciardi	211090	A	
134	52	6132	Mombarcaro	C.na Battaglia	211100	A	Con muro a secco
135	52	6132	Mombarcaro	C.na Battaglia	211100	A	
136	52	6132	Mombarcaro	C.na Battaglia	211100	A	
137	53	6077	Monesiglio	Monesiglio	211100	A	
138	53	6077	Monesiglio	Monesiglio	211100	A	
139	53	6077	Monesiglio	Monesiglio	211100	C	
140	53	6075	Camerana	Piana di Camerana	211100	A	
141	53	6075	Camerana	Bric delle Ginestre	211100	A	
142	53	6075	Camerana	Bric delle Ginestre	211100	A	
143	52	6125	Dogliani	Spinarda	210120	A	
144	52	6125	Dogliani	Spinarda	210120	A	
145	52	6125	Dogliani	Spinardi	210120	A	
146	52	6127	Murazzano	C.se Bruni	210120	C	
147	52	6127	Murazzano	C.se Bruni	210120	A	
148	52	6127	Murazzano	C.se Bruni	210120	A	
149	52	6128	Murazzano	S.Giorgio	210120	A	
150	52	6128	Murazzano	S.Giorgio	210120	A	
151	52	6128	Murazzano	S.Giorgio	210120	A	
152	52	6130	Murazzano	Bric Berico	211090	A	
153	52	6130	Murazzano	Bric Berico	211090	A	A monte strada
154	52	6130	Murazzano	Bric Berico	211090	A	
155	52	6131	S.Benedetto Belbo	S.Benedetto Belbo	211090	A	A monte strada
156	52	6131	S.Benedetto Belbo	S.Benedetto Belbo	211090	A	

157	52	6131	S.Benedetto Belbo	S.Benedetto Belbo	211090	A	
158	52	6132	Niella Belbo	Pian della Valle	211060	A	Con muro alla base
159	52	6132	Niella Belbo	Pian della Valle	211060	A	Con muro alla base
160	52	6132	Niella Belbo	Pian della Valle	211060	A	
161	53	6073	Gottasecca	Valle	211110	C	
162	53	6073	Gottasecca	Villa	211110	C	
163	53	6073	Gottasecca	Valle	211110	C	
164	53	6073	Deگو	Pozzorone	211110	A	Stradale
165	50	6191	Dogliani	Fraz. Martina	210080	A	A monte strada
166	50	6191	Dogliani	Fraz. Martina	210080	C	
167	50	6191	Dogliani	Fraz. Martina	210800	C	
168	50	6193	Murazzano	Fr. Rea-Campolungo	211090	A	
169	50	6193	Murazzano	Rea	211090	A	A monte strada
170	50	6193	Murazzano	Rea	211090	A	
171	48	6062	Feisoglio	Feisoglio	211060	A	Muro a secco
172	48	6062	Feisoglio	Feisoglio	211060	A	Scarpata strada comunale
173	48	6062	Feisoglio	Feisoglio	211060	B	Scarpata strada
174	48	6060	Bossolasco	C.Abete	211050	C	
175	48	6060	Bossolasco	Bric Buscaglino	211050	D	
176	48	6060	Bossolasco	Bric Buscaglino	211050	A	Scarpata strada
177	48	6058	Somano	Somano-Biococca	211050	A	Scarpata strada
178	48	6058	Somano	Somano-Biococca	211050	A	Scarpata strada
179	48	6058	Somano	Somano-Biococca	211050	B	Scarpata strada
180	48	6056	Dogliani	Valdibà	210080	A	

PEND_A B	PEND_B C	PEND_A C	Pend (BC-AB)	GEOM_ L	GEOM_ D	GEOM_ H	USO_SUOL O	GG_DISTACC	ORA_
7	75		68	5,4	22,0	1,1	5		
23	80		57	6,0	11,3	1,0	1		
9	45		36	6,5	27,0	2,0	6	05/11/1994	17.30
		28	0	0,0	0,0	0,0	1	05/11/1994	14.30
32	78		46	8,5	25,0	0,8	5	06/11/1994	0.00
3	47		44	11,5	44,0	2,0	6	06/11/1994	0.00
8	36		28	11,5	26,0	1,1	1	06/11/1994	7.00
		18	0	9,0	53,0	1,5	5	05/11/1994	18.15
19	44		25	4,2	38,0	1,0	1	06/11/1994	8.00
7	41		34	12,0	17,0	2,0	6	06/11/1994	8.30
14	41		27	11,0	46,0	1,2	1	05/11/1994	7.00
15	82		67	3,8	10,5	1,0	2	05/11/1994	7.00
15	56		41	4,0	25,0	1,2	2	05/11/1994	7.00
16	70		54	4,5	27,0	1,0	1		
18	29		11	23,5	19,0	1,3	1	05/11/1994	9.30
20	30		10	11,0	16,0	1,0	1	05/11/1994	9.30
40	65		25	12,5	15,5	1,0	6	05/11/1994	11.30
39	80		41	8,0	18,5	0,9	6	05/11/1994	11.30
		38	0	8,0	32,0	0,8	6	05/11/1994	18.50
23	65		42	9,5	49,0	1,5	4	05/11/1994	21.00
24	85		61	4,5	29,0	1,0	4	05/11/1994	21.00
22	85		63	6,5	24,0	1,4	1	05/11/1994	21.30

3	48		45	6,9	4,9	0,4	1	05/11/1994	16.00
0	40		40	6,1	12,9	0,5	1	05/11/1994	16.00
0	37		37	19,0	8,0	1,1	6	05/11/1994	16.00
		23	0	14,5	15,6	1,5	6		
9	44		35	15,4	18,3	1,0	6		
5	47		42	9,0	25,0	0,9	2		
4	43		39	20,0	14,8	2,0	6	05/11/1994	19.30
4	39		35	8,0	14,5	1,1	6	05/11/1994	19.30
3	42		39	11,0	22,0	1,2	6	05/11/1994	19.30
22	49		27	18,5	6,3	0,4	6	05/11/1994	7.30
11	55		44	42,0	7,0	0,4	1	05/11/1994	7.30
11	55		44	8,0	11,0	0,5	1	05/11/1994	7.30
13	55		42	4,6	12,0	1,4	6	05/11/1994	22.00
3	52		49	10,0	8,5	1,5	6	05/11/1994	22.00
3	45		42	16,0	24,0	0,8	6		
0	45		45	6,5	15,0	1,3	6	06/11/1994	0.00
4	85		81	7,0	11,0	1,1	6	06/11/1994	1.00
15	75		60	2,0	5,6	0,6	6	06/11/1994	1.00
		49	0	8,5	10,5	0,4	6	05/11/1994	7.30
		30	0	11,2	10,8	0,6	1	05/11/1994	7.30
		37	0	22,5	9,5	0,4	1	05/11/1994	7.30
2	45		43	12,0	14,0	1,2	6		
32	85		53	13,5	16,5	1,8	6	05/11/1994	17.30
		33	0	13,5	5,0	0,6	6	05/11/1994	17.30
		33	0	12,0	4,0	0,8	6	05/11/1994	17.30
2	38		36	18,0	15,0	1,4	5	05/11/1994	22.30
19	60		41	8,5	11,5	0,6	5	05/11/1994	16.00
8	47		39	11,0	33,0	1,3	6	05/11/1994	22.30
6	85		79	3,5	15,5	0,7	2	05/11/1994	22.00
0	37		37	7,0	11,0	0,3	2	05/11/1994	22.00
1	52		51	7,5	21,5	1,0	2		
		16	0	13,0	37,0	0,5	1	05/11/1994	16.30
		22	0	16,0	12,5	1,4	6	05/11/1994	23.00
32	53		21	7,5	20,0	0,5	6	05/11/1994	23.00
24	57		33	5,8	15,5	1,0	6	05/11/1994	17.00
21	85		64	5,5	24,0	1,2	6	05/11/1994	18.00
20	50		30	7,5	29,0	1,1	2	05/11/1994	18.00
27	56		29	9,5	10,0	0,8	2	06/11/1994	3.00

Distacchi da 181 a 238

CODICE	STRISCIATA	FOTOGRAMMA	COMUNE	LOCALITA	SEZ_CTR	TIPO_FRANA	DESCR_ORLO
181	48	6056	Dogliani	Valdibà	210080	A	
182	42A	5027	Alice Belcolle	C.Ritti	0	A	
183	42A	5027	Alice Belcolle	C.Ritti	0	A	A monte strada
184	43A	5050	Montabone	Loc. La Valle	0	A	Scarpata strada
185	43A	5051	Castel Boglione	Case Fandelle	0	A	
186	43A	5051	Castel Boglione	Case Fandella	0	A	

187	43A	5053	Cassinasco	Cassinasco	193120	A	Scarpata strada
188	43A	5055	Canelli	Merlini	193120	A	Scarpata strada
189	43A	5055	Canelli	Merlini	193120	A	Scarpata stradale
190	43A	5056	Loazzolo	Casa Bricco	193120	A	
191	43A	5056	Loazzolo	Case Bricco	193120	A	
192	43A	5057	S.Stefano Belbo	San Grato	193110	A	Scarpata tra due strade
193	43A	5057	S.Stefano Belbo	S.Grato	193110	D	
194	43A	5057	S.Stefano Belbo	S.Grato	193110	A	Scarpata valle strada
195	44A	5109	Alba	B.ta Prandi - S.Rosalia	193090	A	
196	44A	5109	Alba	B.ta Prandi - S.Rosalia	193090	A	Cortile a monte strada
197	44A	5109	Diano D'Alba	Diano D'Alba	193130	A	
198	44A	5109	Diano d'Alba	Diano d'Alba	193090	A	Scarpata strada valle
199	44A	5109	Diano d'Alba	Diano d'Alba	193090	B	
200	45A	5154	Rodello	Cagnasso	193130	A	
201	45A	5154	Rodello	Cagnasso	193130	A	
202	45A	5151	Borgomale	Croce	193140	A	
203	45A	5151	Borgomale	Croce	193140	A	
204	45A	5151	Borgomale	Croce	193140	A	
205	45A	5151	Borgomale	Croce	193140	A	
206	45A	5149	Rocchetta Belbo	Pia	193150	B	
207	45A	5149	Rocchetta	Pia	193150	A	
208	45A	5149	Rocchetta Belbo	Pia	193150	A	
209	44A	5118	Cossano Belbo	Scorrone	193150	A	A monte strada
210	44A	5118	Cossano Belbo	Scorrone	193150	A	
211	45A	5147	Vesime	Cavalleri	193150	A	Muro a secco a monte
212	45A	5147	Vesime	Cavalleri	193150	A	A monte strada
213	45A	5147	Vesime	Cavalleri	193150	A	A monte strada
214	46A	5205	Cortemilia	C.Florin	211030	D	
215	46A	5205	Cortemilia	C.Florin	211030	C	
216	44A	5113	Borgomale	Madonna	193140	A	A monte strada
217	44A	5113	Borgomale	Madonna	193140	A	A monte strada
218	44A	5113	Borgomale	Madonna	193140	A	A monte strada
219	50	6199	Prunetto	Prunetto	211100	B	
220	50	6199	Prunetto	Prunetto	211100	A	
221	50	6199	Prunetto	Prunetto	211100	A	
222	52	6137	Castelletto Uzzone	Teiso (Scaletta)	211110	C	
223	52	6137	Castelletto Uzzone	Teiso	211110	A	
224	52	6137	Castelletto Uzzone	Teiso	211110	A	
225	48	6066	Pezzolo	Blengi	211070	C	
226	48	6066	Pezzolo	Blengi	211070	C	
227	48	6066	Pezzolo	Blengi	211070	C	
228	48	6066	Cortemilia	Piovero	211030	A	
229	48	6066	Cortemilia	Piovero	211030	A	
230	47	6143	Torre Bormida	Fontane	211020	A	A monte strada con muro a secco
231	47	6143	Torre Bormida	Fontane	211020	A	A monte strada con muro a secco
232	47	6143	Torre Bormida	Fontane	211020	A	A monte strada con muro a secco
233	48	6064	Levice	Levice	211060	A	A monte strada
234	48	6064	Levice	Levice	211060	A	A monte strada

235	48	6064	Levice	Levice	211060	A	A monte strada
236	48	6064	Gorzegno	Pianelle	211060	A	
237	48	6064	Gorzegno	Pianelle	211060	A	
238	48	6064	Gorzegno	Pianelle	211060	A	

PEND_A B	PEND_B C	PEND_A C	Pend (BC-AB)	GEOM_ L	GEOM_ D	GEOM_ H	USO_SUOL O	GG_DISTACC	ORA_
17	56		39	9,5	13,0	1,0	6	06/11/1994	3.00
2	55		53	2,2	3,5	0,5	6		
15	44		29	5,8	16,5	0,9	4		
18	55		37	17,0	6,3	0,4	1		
25	75		50	23,0	20,0	0,3	2	06/11/1994	3.00
18	60		42	6,8	7,3	0,8	1	06/11/1994	3.00
11	60		49	3,1	15,5	0,5	2		
38	60		22	2,0	4,1	0,4	2	05/11/1994	8.00
28	47		19	3,0	5,0	0,4	6		
19	45		26	8,7	7,5	0,6	6		
31	40		9	18,5	5,8	0,7	6		
2	40		38	7,0	14,0	0,7	4	05/11/1994	11.30
		38	0	9,5	21,0	0,4	6	05/11/1994	10.00
5	42		37	2,0	9,0	0,6	6	05/11/1994	10.00
10	50		40	8,5	14,0	1,0	6	05/11/1994	19.00
2	48		46	11,5	26,0	0,7	6	05/11/1994	18.30
2	38		36	26,0	11,5	3,0	6	05/11/1994	18.30
3	46		43	7,8	9,5	1,5	6	05/11/1994	13.30
5	40		35	21,0	46,5	1,0	1	05/11/1994	13.30
2	42		40	9,0	10,5	1,3	6	05/11/1994	18.00
0	43		43	16,0	9,5	1,2	5		
2	47		45	5,5	18,0	1,1	6	05/11/1994	11.00
2	39		37	5,5	10,5	1,0	1	05/11/1994	10.00
19	30		11	6,3	47,0	0,8	1	05/11/1994	13.00
19	42		23	7,0	13,0	0,7	6	05/11/1994	13.00
0	28		28	25,0	13,0	0,7	1		
3	85		82	3,2	10,5	0,7	6		
8	31		23	7,0	9,0	0,9	6		
16	41		25	7,0	13,8	0,6	6	05/11/1994	12.30
16	41		25	15,0	16,0	0,8	6	05/11/1994	10.40
6	47		41	7,5	12,7	0,7	6		
2	42		40	7,0	29,0	0,6	6		
4	65		61	5,8	14,7	0,9	5		
		34	0	70,0	9,5	1,0	6		
		36	0	30,0	7,9	1,5	1		
18	40		22	6,0	28,0	0,6	1	05/11/1994	18.00
18	38		20	9,0	47,0	0,9	1	05/11/1994	18.00
20	43		23	4,5	8,0	0,5	6	05/11/1994	18.00
4	34		30	11,0	20,8	1,0	6	05/11/1994	20.00
4	48		44	7,5	15,4	0,7	6	05/11/1994	20.00
1	35		34	7,0	39,0	1,0	1	05/11/1994	20.00
		26		17,0	27,8	1,7	1	05/11/1994	12.00
18	53		35	2,8	6,7	0,4	1	05/11/1994	9.30

13	75		62	12,0	24,0	2,0	1	05/11/1994	12.00
		30		16,0	4,5	0,6	1	05/11/1994	8.00
		30		19,0	17,0	1,1	6	05/11/1994	8.00
		32		17,0	13,5	0,7	6	05/11/1994	8.00
11	90		79	5,5	17,0	1,2	2	05/11/1994	17.00
2	52		50	6,5	7,5	0,7	5	05/11/1994	17.00
6	80		74	5,0	11,0	0,8	5	05/11/1994	8.00
16	85		69	0,0	14,0	1,2	6	05/11/1994	20.00
0	28		28	6,0	13,0	1,0	1	05/11/1994	20.00
18	39		21	4,8	5,5	0,7	1		
18	42		24	8,0	10,0	0,8	1		
16	51		35	4,5	6,0	0,4	4		
12	41		29	7,5	9,8	0,8	5	05/11/1994	6.00
4	85		81	7,5	14,7	1,0	4	05/11/1994	10.00
23	85		62	9,5	27,0	1,0		05/11/1994	10.00

USO SUOLO	
1	Prato
2	Coltivo
3	Bosco
4	Vigneto
5	Frutteto
6	Incolto

